

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**UTILIZACIÓN DEL DESECHO DE SÍLICE DE LA GEOTÉRMICA
DE CERRO PRIETO, MEXICALI, BC, MÉXICO, EN LA
FABRICACIÓN DE VIDRIO FLOTADO**

POR

ALBERTO SOLÍS OBA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

NOVIEMBRE, 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**UTILIZACIÓN DEL DESECHO DE SÍLICE DE LA GEOTÉRMICA
DE CERRO PRIETO, MEXICALI, BC, MÉXICO, EN LA
FABRICACIÓN DE VIDRIO FLOTADO**

POR

ALBERTO SOLÍS OBA

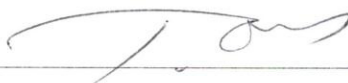
**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

NOVIEMBRE, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **“UTILIZACIÓN DEL DESECHO DE SÍLICE DE LA GEOTÉRMICA DE CERRO PRIETO EN LA FABRICACIÓN DE VIDRIO FLOTADO”** realizada por el L. Q. ALBERTO SOLIS OBA, con número de matrícula 1654721, sea aceptada para su defensa como opción al grado de **“MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA con especialidad en MATERIALES”**.

El comité de tesis.



Asesor y director de tesis, Dr. Tushar Kanthi Das Roy.



Revisora: Dra. Bindu Krishnan

Revisor: Dr. Shaji Sadasivan



Dr. Simón Martínez Martínez.
Subdirector de estudios de posgrado

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero expresar mi eterno agradecimiento a Dios, por dejarme concluir esta Maestría en Ciencias.

También quiero agradecer sinceramente a la Dirección de Grupo Vitro, al C.P. Alberto Hernández Tellez, a las áreas de Recursos Humanos y Tecnología por su aprobación, apoyo económico y facilidades para la realización de esta maestría, y en especial al Ing. Roberto Cabrera por darme la oportunidad de realizar estos estudios, así como por su apoyo, asesoría y facilidades.

A mi asesor y director de tesis, el Dr. Tushar Kanthi Das Roy, así como a la Dra. Bindu Krishnan y el Dr. Shaji Sadasivan por formar parte del Comité de Tesis y por sus valiosas sugerencias en la revisión del presente trabajo.

A la UANL, en particular a la FIME y a todos sus catedráticos con los que tuve contacto y fueron mis maestros directa o indirectamente.

A los Ing. Saul Ruiz, Luis Betancourt y el Sr. Guadalupe Pastrana por su ayuda y por proporcionarme información de mucha utilidad en este trabajo.

A mi hermana Myrna y a mi hija Alma por su valiosa ayuda con información y apoyo, así como en la revisión y corrección de este documento.

Finalmente, y no menos importante, quiero agradecer especialmente a mi esposa Conchita y a mis hijos Alberto y Alma por apoyarme durante la elaboración de esta tesis y por hacer que mi vida tenga sentido.

RESUMEN.

En este trabajo se utilizaron 2 muestras sólidas de material de desecho de la planta geotérmica de Cerro Prieto, la cual se encuentra ubicada en Mexicali, Baja California, México; provenientes de dos yacimientos diferentes, una de ellas con un contenido de sílice de 92.5 % (muestra 1), y la otra, visiblemente más impura, con 41.8% de sílice (muestra 2).

Primeramente se caracterizaron estos materiales, realizando análisis de radiactividad, granulometría, pérdidas por ignición, difracción de rayos X y composición química por medio de fluorescencia de rayos X (FRX), encontrando básicamente que este material no puede utilizarse directamente en la fabricación de vidrio flotado debido a sus contaminantes, principalmente el cloro, así como por su alto contenido de material fino. La especificación de tamaño requerido es 0% de material menor a 0.07 mm, y las muestras 1 y 2 presentaron 33 y 14% respectivamente de partículas menores a este valor.

El presente proyecto se enfocó en buscar soluciones a estos inconvenientes para poder utilizar este desecho como materia prima en la fabricación de vidrio flotado.

Con el objetivo de retirar los contaminantes e incrementar el porcentaje de sílice en el material, se realizaron pruebas de lavado con agua “en frío” (a unos 22°C) y con agua caliente (a 80 +-10°C), analizando las muestras con FRX entre cada prueba.

La muestra #1 cumplió con los requerimientos de cloro (máximo 0.1%) y de sílice (mínimo 97%) en 5 lavados, sin embargo la muestra #2 no cumplió aceptablemente la especificación para sílice, logrando alrededor de 96%. El nivel requerido de cloro sí se

alcanzó entre 7 y 8 lavados. Para ambas muestras la diferencia entre el lavado con agua caliente y con agua fría fue marginal.

Para solucionar el problema del alto contenido de material fino se hicieron pruebas de aglomeración de las materias primas para la fabricación de vidrio flotado, incluyendo un porcentaje de desecho geotérmico. El método seleccionado fue la pelletización en plato, por considerarse un método sencillo en el laboratorio y el más viable a nivel industrial.

Se probaron 2 ligantes diferentes, además del agua: silicato de sodio e hidróxido de sodio, ambos en solución acuosa. El que dio mejores resultados fue este último, tanto en porcentaje de pelletización como en resistencia de los pellets formados.

La mejor condición encontrada fue con 22% de hidróxido de sodio en solución acuosa al 25% en peso, más 25 % de agua extra y un porcentaje de sustitución del 15% de desecho geotérmico reemplazando a la arena en la fórmula del vidrio.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Energía geotérmica.	2
1.1.1 Generalidades.	2
1.1.2 Plantas de energía de vapor seco.	3
1.1.3 Plantas de vapor flash.	3
1.1.4 Plantas de ciclo binario.	4
1.1.5 Planta Geotérmica de Cerro Prieto.	5
1.2 El vidrio.	6
1.2.1 Definición de vidrio.	6
1.2.2 Materias primas para la fabricación de vidrio.	7
1.2.2.1 Vitrificantes.	7
1.2.2.1.1 Sílice.	8
1.2.2.1.2 Contaminantes, el cloro.	8
1.2.2.1.3 Granulometría.	9
1.2.2.2 Fundentes.	10
1.2.2.2.1. Carbonato de sodio.	10
1.2.2.2.2. Sulfato de sodio.	11
1.2.2.3 Estabilizantes.	11
1.2.2.3.1 Óxido de calcio.	11
1.2.2.3.2 Óxido de magnesio.	12
1.2.2.3.3 Óxido de aluminio.	12
1.2.2.4 Componentes secundarios.	13
1.2.3 El Vidrio flotado.	13
1.2.3.1 Las bases del proceso.	13
1.2.3.2 La preparación de materias primas.	14
1.2.3.3 El horno.	14
1.2.3.4 La cámara de flotado.	17
1.2.3.5 El recocedor.	18
1.2.3.6 La línea de corte y el bajado del producto.	19
1.3 Fluorescencia de rayos X	20
1.4 Difracción de rayos X	21
1.5 Aglomeración de materiales.	23
1.5.1 Teoría de la pelletización.	23
1.5.2 Efecto del agua en la pelletización.	24
1.5.3 Mecanismos de crecimiento de los pellets.	26
1.5.4 Equipos para pelletizado.	27
1.5.4.1 Discos pelletizadores.	27
1.5.4.2 Tambores pelletizadores.	29

1.5.4.3 Secado y endurecimiento de los pellets.	30
1.5.5 Caracterización de los pellets.	31
1.5.5.1 Tamaño.	31
1.5.5.2 Humedad.	31
1.5.5.3 Resistencia a la compresión.	32
1.5.5.4 Resistencia a las caídas.	32
1.5.6 Uso de material aglomerado para la fabricación de vidrio.	33
1.6 Objetivos e hipótesis.	34
1.6.1 Objetivo general.	34
1.6.2 Objetivos particulares.	34
1.6.3 Hipótesis.	34
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.	35
2.1 Materiales.	35
2.2 Descripción del equipo experimental.	36
2.3 Preparación inicial de las muestras.	37
2.4 Lavado del desecho geotérmico.	38
2.5 Granulometría.	38
2.6 Pérdidas por ignición.	39
2.7 Pelletizado del desecho geotérmico	40
2.8 Diseño de experimentos.	43
2.9 Caracterización de los pellets.	44
2.9.1 Prueba de vibración.	44
2.9.2 Determinación del porcentaje de humedad.	45
2.9.3 Resistencia a la compresión.	46
2.10 Pruebas de fusión de los pellets para preparar vidrio.	46
2.11 Análisis de los licores.	47
2.12 Análisis químico por fluorescencia de rayos X.	47
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	49
3.1 Caracterización inicial de las muestras de desecho geotérmico.	49
3.1.1 Radiactividad.	49
3.1.2 Pérdidas por ignición	50
3.1.3 Fluorescencia de rayos X.	50
3.1.4 Granulometría inicial	51
3.1.5 Difracción de rayos X en polvo	52
3.1.6 Lavado del desecho geotérmico.	54
3.1.7 Análisis de los licores	55
3.2 Experimentos de lavado.	55
3.2.1 Experimentos de lavado números 1 y 2.	56
3.2.2 Experimento de lavado número 3.	58
3.2.3 Experimentos de lavado números 4 y 5.	59
3.2.4 Resultados completos de los experimentos de lavado.	61

3.2.5 Granulometría final.	62
3.3 Experimentos de pelletización.	63
3.3.1 Resumen del comportamiento de la pelletización.	63
3.3.2 Experimentos exploratorios.	65
3.3.2.1 Experimentos con 100% arena sílica como vitrificante.	65
3.3.2.2 Experimentos con 100% DG como vitrificante.	66
3.3.2.3 Experimentos con 20 al 50% de DG como vitrificante.	67
3.3.2.4 Experimentos con 5 al 10% de DG como vitrificante.	71
3.3.3 Diseño de experimentos.	71
3.3.3.1 Humedad.	72
3.3.3.2 Porcentaje de formación de pellets.	73
3.3.3.3 Resistencia a la carga.	75
3.3.3.4 Resistencia a las caídas.	76
3.3.3.5 Prueba de vibración.	77
3.3.3.6 Resultados completos de pruebas de pelletización.	78
3.4 Experimentos de fusión de los pellets formados.	81
4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.	83
4.1 Conclusiones.	83
4.1.2 Trabajo futuro.	84
BIBLIOGRAFIA.	86

LISTA DE TABLAS.

Tabla	Página
I. Composición típica de los principales tipos de vidrio.	7
II. Composición de las materias primas utilizadas para la pelletización	36
III. Equipo utilizado en la parte experimental.	36
IV. Mezcla de materias primas utilizadas en las pruebas	42
V. Descripción de unidades experimentales, bloque 1.	43
VI. Descripción de unidades experimentales, bloque 2.	44
VII. Composición inicial del desecho geotérmico (Fluorescencia de rayos X) . .	50
VIII. Granulometría inicial de las muestras de desecho geotérmico	52
IX. Composición química de los sólidos disueltos en el agua de lavado DG . .	55
X. Resultados de los análisis durante el lavado del desecho geotérmico. . . .	62
XI. Resultados de granulometría del desecho geotérmico.	63
XII. Pelletización con 100% de arena de sílice como vitrificante.	66
XIII. Pelletización con 100% de DG como vitrificante.	67
XIV. Pelletización con 20 al 50% de DG como vitrificante.	70
XV. Pelletización del diseño de experimentos.	72
XVI. Resultados del comportamiento de todas las pruebas de pelletización. . . .	79

LISTA DE FIGURAS.

Figura	Página
1. Esquema de la tecnología flash para la generación de energía eléctrica	4
2. Esquema de la tecnología binaria para la generación de energía eléctrica	5
3. Arreglo atómico regular de silicio y oxígeno en forma de cuarzo	7
4. Átomos desordenados de silicio y oxígeno en forma de vidrio	7
5. Diagrama del proceso de fabricación de vidrio flotado	13
6. Vista de las flamas de los quemadores de un horno de vidrio flotado	15
7. Esquema de un horno de vidrio flotado mostrando el flujo de los gases de combustión, incluyendo su paso por las cámaras regeneradoras	16
8. Corte mostrando el final de la zona de acondicionamiento, la compuerta, máquinas atenuadoras y el vidrio fluyendo en la cámara de flotado.	17
9. Producción de fluorescencia en un átomo	20
10. Difractogramas de la sílice en 5 de sus diferentes estructuras	23
11. Estados de la formación de los pellets	25
12. Mecanismos de formación y cambios en los pellets durante el proceso de aglomeración	27
13. Producción continua de pellets en disco	28
14. Tambor pelletizador	29
15. Muestra #2 de DG antes de molerla	37
16. Pelletizadora en operación y con pellets	42
17. Difractograma de muestra #1 de desecho geotérmico	53
18. Difractograma de muestra #2 de desecho geotérmico	54

19. Gráfica del contenido de sílice, muestra 1	56
20. Gráfica del contenido de cloro, muestra 1	57
21. Gráfica del contenido de sílice, muestra 2	58
22. Gráfica del contenido de cloro, muestra 2	59
23. Gráfica del contenido de sílice, muestra 2.	60
24. Gráfica del contenido de cloro, muestra 2	60
25. Transformación de pellets en el tiempo	68
26. Esquema de la polimerización del silicato de sodio	70
27. Gráfica de humedad de pellets	73
28. Porcentaje de formación de pellets mayores a 1.68 mm	74
29. Porcentaje de formación de pellets, dos tamaños	75
30. Gráfica de resistencia a la carga de los pellets.	76
31. Gráfica de resistencia a las caídas de los pellets.	77
32. Gráfica de las pérdidas por vibración de los pellets	78
33. Experimentos de fusión de los pellets.	81

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN.

En este capítulo encontraremos una descripción general de la energía geotérmica y sus principales tecnologías; la definición y características de los vidrios, se describirá el proceso de fabricación del vidrio flotado, así como sus componentes principales; las técnicas de caracterización utilizadas en este proyecto así como información sobre el proceso de aglomeración de material, y finalmente se presentan los objetivos e hipótesis.

La principal materia prima para la fabricación del vidrio arquitectónico, automotriz y envases, es la sílice, la cual normalmente se utiliza en forma de arena de cuarzo. Grupo Vitro posee tres plantas de vidrio flotado, dos de ellas en García, Nuevo León, y la tercera se encuentra en Baja California, México, la cual consume actualmente arena proveniente de Nevada, EUA. Como parte de los proyectos de reducción de costos de operación para esta planta, se propuso la utilización del desecho (salmuera) de la planta geotérmica de Cerro Prieto como materia prima. Esta instalación está localizada a aproximadamente 30 Km de la planta de vidrio flotado, lo que sería una gran ventaja en la reducción de costos de fletes.

El presente proyecto fue desarrollado para determinar la factibilidad técnica de la utilización de este material como materia prima en la fabricación de vidrio flotado.

1.1 Energía Geotérmica.

1.1.1 Generalidades.

La energía geotérmica es aquella producida en el calor interno de la Tierra, misma que en algunos puntos del planeta calienta mantos acuíferos a temperaturas arriba del punto de ebullición del agua, formando agua y vapor a alta presión. Los géiseres son claro ejemplo de esto (1).

Esta energía puede ser utilizada para generar electricidad, además de proveer calor para otros usos. Existen localidades en las que esta energía se utiliza “en cascada” es decir, primeramente se usa en la generación de energía eléctrica en plantas geotérmicas, posteriormente sale a unos 150°C para ser aprovechada en procesos industriales, saliendo a unos 100°C, dirigiéndola a conjuntos residenciales e invernaderos y finalmente se utiliza en granjas piscícolas, terminando su ciclo a unos 20°C (1).

Si bien la energía geotérmica se puede encontrar en toda la superficie terrestre, no en todas partes se puede aprovechar significativamente. El gradiente de temperatura en la corteza terrestre es típicamente de 30°C/Km, aunque en algunas regiones rebasa los 150°C/Km, que es en donde es más rentable la explotación de este recurso (2).

En el año 2008 aproximadamente el 0.1% de la energía eléctrica a nivel mundial era producida en plantas geotérmicas, y se estima que para el año 2050 aproximadamente el 3% de la energía eléctrica será producida por esta fuente (3).

Existen varios tipos de tecnologías que pueden convertir la energía geotérmica en eléctrica, las más importantes son: “vapor seco”, “vapor flash” y “ciclo binario”. Las plantas que cuentan con más de un tipo de tecnología se llaman “híbridas” (1,4).

1.1.2 Plantas de energía de vapor seco.

Este tipo de plantas son las más sencillas de todas, se utilizan por ejemplo para evaluar locaciones con buen potencial para una inversión económica. En esta tecnología el vapor se obtiene del subsuelo a una temperatura de aproximadamente 230 a 320°C para mover las turbinas que generan la energía eléctrica. En ocasiones sale del pozo una mezcla de agua con vapor, en cuyo caso se tienen que separar, pudiendo aprovechar el líquido caliente en otro tipo de tecnología, como la binaria. La tecnología de vapor seco es una de las formas más limpias de generación de energía eléctrica; produciendo una gran cantidad de vapor de agua, pero muy pocos gases (1, 4).

1.1.3 Plantas de vapor Flash.

En la tecnología de vapor flash el agua caliente es inyectada en un tanque a baja presión para que ésta se vaporice (a esto se le llama “flash”, en español sería “expansión rápida”); este vapor es quien mueve las turbinas. Si queda agua en el tanque a una temperatura suficientemente alta, se puede realizar un segundo “flash” para mover otra turbina (“doble flash”). Después de utilizarse, el vapor se vuelve a condensar y se inyecta nuevamente a la corteza terrestre (1,2), tal como se muestra en la figura 1. Esta solía ser la tecnología geotérmica más común en la generación de energía eléctrica hace una década, pero fue reemplazada por el ciclo binario (2,3).

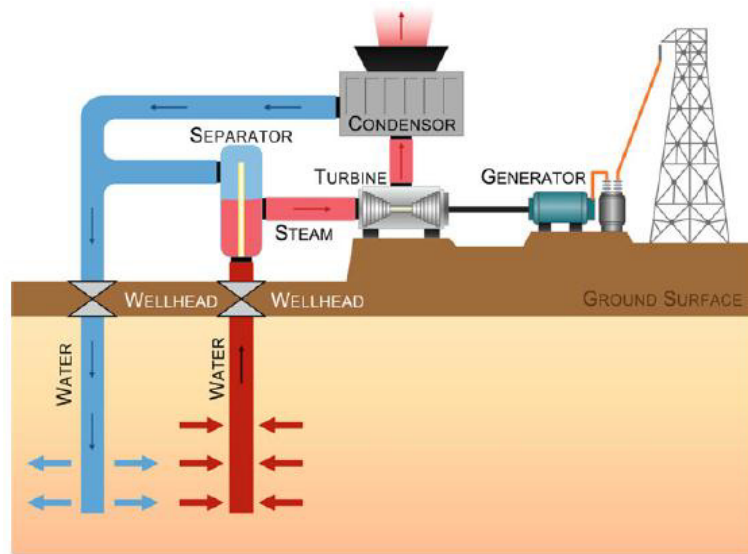


Figura 1. Tecnología flash para generación de energía eléctrica (Guerero-Lemus 2013)

1.1.4 Plantas de ciclo binario.

Esta tecnología es líder y la de más rápido crecimiento actualmente, inclusive algunas plantas tipo “vapor flash” están cambiando paulatinamente a este nuevo diseño ya que tiene importantes ventajas, principalmente el hecho de que es un sistema cerrado, con lo que tiene prácticamente cero emisiones de contaminantes a la atmósfera; también es muy importante el hecho de que se puede utilizar agua de pozos a menores temperaturas que los tipos anteriormente explicados, inclusive es posible utilizarla desde unos 60°C pero su rentabilidad en este caso es prácticamente cero (1,2).

Este tipo de plantas consisten de pozos que extraen agua caliente, misma que pasa a través de un intercambiador de calor, en donde se utiliza para vaporizar otro líquido de menor temperatura de ebullición, y este vapor es el que mueve las turbinas. El agua caliente se bombea nuevamente al subsuelo (ver figura 2).

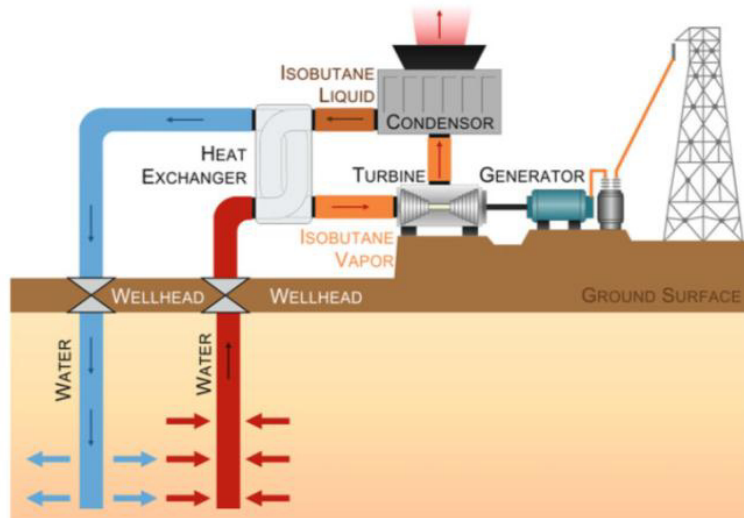


Fig 2. Tecnología binaria para generación de energía eléctrica (Guerrero-Lemus 2013)

Los líquidos “binarios” son compuestos orgánicos o bien una mezcla de al menos 2 componentes (usualmente agua y amoníaco). Inclusive se pueden tener varios líquidos con puntos de ebullición paulatinamente menores, lo que permite tener intercambiadores de calor y turbinas sucesivos, aprovechando más eficientemente el calor del agua (1, 2).

1.1.5 Planta geotérmica de Cerro Prieto.

Esta planta se encuentra ubicada en el municipio de Mexicali, Baja California, México (Latitud: N ° 32.418 32 ° 25’6 “N, longitud: 115,305 ° W 18’18 115 ° “W) ; ha estado trabajando desde 1973, utilizando tecnología “vapor flash”. Tiene una capacidad instalada de 620 MW y genera aproximadamente 6,400 ton/h de desechos (salmuera), lo que significa unas 6 toneladas por hora de sílice (5). Estos desechos se ponen a secar en una laguna seccionada de 18.6 Km². Una vez seco este material, se confina en terrenos cercanos a la laguna, cubiertos con capas de tierra para evitar contaminación del aire, ya que debido a su bajo tamaño de partícula, fácilmente puede ser arrastrado por el viento.

Se han hecho intentos de utilizar masivamente este material en pavimentos, cemento, otros materiales de construcción, etc., pero a la fecha no tiene uso importante. (5). En otras plantas Geotérmicas este desecho se utiliza como fuente de obtención de metales, por ejemplo litio y zinc, así como para obtener sílice de alta pureza (6).

1.2 El vidrio.

1.2.1. Definición de vidrio.

No hay una definición aceptada globalmente en cuanto a lo que es un vidrio, pero este término normalmente se refiere al producto de la fusión de materiales inorgánicos que se ha enfriado a un estado “rígido” sin cristalizarse, aunque también es polémica la distinción si los materiales orgánicos generan vidrios o no (7). Al enfriarse el vidrio fundido, sus átomos tienden a buscar arreglos ordenados, pero si este enfriamiento es suficientemente rápido, no tienen oportunidad de acomodarse, por lo que se quedan en forma desordenada, compartiendo propiedades de sólidos y líquidos.

A un arreglo de átomos, iones o moléculas regular, con ordenación geométrica y periodicidad de largo alcance, formando una red bien definida, se le llama cristalino (ver figura 3), mientras que a uno irregular, se le llama amorfo (ver figura 4). Todos los sólidos presentan un arreglo cristalino, amorfo o una combinación de ambos. Los líquidos sólo presentan átomos desordenados, mientras que el vidrio por su parte, presenta un arreglo atómico muy similar al de los líquidos, formando lo que se llama una red vítrea, la cual se puede observar en la figura 4, pero con la rigidez mecánica de los cristales. Aún hoy en día continúa la polémica sobre si el vidrio debe ser considerado como un sólido o como un líquido (7).

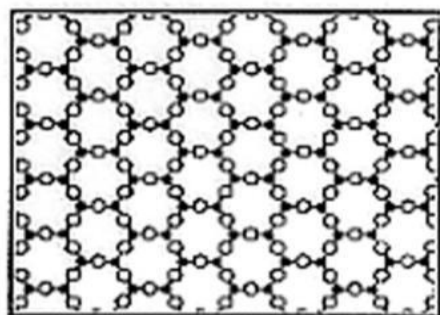


Figura 3. Arreglo atómico regular de silicio y oxígeno en forma de cuarzo.

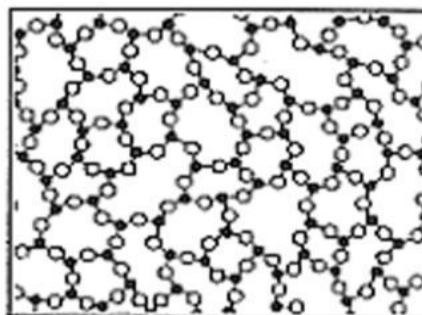


Figura 4. Átomos desordenados de silicio y oxígeno en forma de vidrio

1.2.2. Materias primas para la fabricación de vidrio.

En la tabla I se presentan ejemplos de composiciones típicas de vidrios. Existen infinidad de materiales que pueden formar parte de un vidrio, se pueden agrupar a partir de su función dentro del mismo, distinguiendo cuatro tipos principales: 1) vitrificantes, 2) fundentes, 3) estabilizantes y 4) componentes secundarios (9).

Tabla I. Composición típica de algunos tipos de vidrio (NCNG 2012).

Composición en peso (%)	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Envases, claro	72.6	13.7	0.5	11	0.1	1.6	<0.05
Envases, verde	72	15.1		8.4	2.1	1.1	0.4
Vidrio flotado claro	71	14	0.8	9	5	1	0.06
Vidrio flotado verde	70	14	0.8	9	5	1	0.3-1
Displays LCD	59	<0.1	<0.1	7	1	15	0
Platos y vasos	75.6	13.5	4.1	3.7	2.7	0.4	0.02

1.2.2.1. Vitrificantes.

Aquí encontramos los materiales que son capaces de formar vidrio, por ejemplo SiO₂, B₂O₃, P₂O₅, BeF₂, PbCl₂, etc, pero los de fabricación predominante son a base de sílice, debido a su bajo costo y buena resistencia mecánica, al medio ambiente y a agentes químicos. Representa aproximadamente del 70 al 73 % en peso en el vidrio flotado (7).

1.2.2.1.1. La sílice. La sílice o dióxido de silicio (SiO_2) es la especie química más abundante de la corteza terrestre, representando aproximadamente un 60% de ésta, pudiendo estar libre o combinada para formar diversos minerales y rocas. Se han identificado veintidós fases diferentes de la sílice, las más comunes son cuarzo, cristobalita y tridimita. Al calentar el cuarzo a presión atmosférica pasará por otras 3 fases diferentes antes de fundirse, siempre y cuando permanezca el tiempo suficiente en cada región de temperatura para que sus partículas se puedan acomodar en el nuevo arreglo cristalino, pero si el calentamiento es suficientemente rápido, pasará de cuarzo hasta líquido sin formar las fases intermedias (7).

Para la fabricación del vidrio “común” se utiliza como principal materia prima la sílice en forma de arena de cuarzo. Si bien no se requiere sílice de alta pureza para la manufactura de este tipo de vidrio, sí debe contar con ciertas características para cumplir con la calidad de vidrio requerida, así como para evitar daños a los hornos de fundición (8), siendo relativamente pocos los yacimientos que cumplen con las exigencias requeridas a nivel mundial (7). En México existen yacimientos importantes de este material en Coahuila y Veracruz.

El contenido de sílice en una arena para la fabricación de vidrio flotado normalmente es de al menos 97%, pero existen especificaciones para algunos contaminantes en este material que pueden afectar el color, provocar defectos en el producto final, etc. (especificaciones internas Vitro).

1.2.2.1.2. Contaminantes. El cloro. El cloro es un caso particular de contaminante, ya que reacciona rápidamente con el sodio, volatilizándose de la superficie del vidrio

fundido; este vapor reacciona con el SO_3 presente en la atmósfera interior del horno, condensándose como sulfato de sodio en el refractario, en el fondo de los regeneradores y el fondo de la chimenea principalmente, provocando acumulamientos importantes que pueden bloquear el paso de los gases o el mecanismo de las compuertas del horno (10). El límite para cloro es máximo 0.1% en las materias primas para vidrio.

1.2.2.1.3. Granulometría. Además de la composición química, también es muy importante la granulometría en las materias primas, ya que si éstas contienen partículas muy grandes, puede tardar más tiempo en fundirse este material, además de que formaría regiones no homogéneas en la mezcla de vidrio fundido; por ejemplo en el caso de la arena, si tiene granos mayores a 2 a 3 mm, muy probablemente quedarían partículas de SiO_2 sin fundirse, apareciendo como defectos (cristales) en el producto final.

Si el material tiene alto contenido de partículas finas (menores a 0.07 mm) también provoca problemas en el horno, ya que éstas se fundirán más rápidamente, formando una masa vítrea muy viscosa, dificultando que salgan los gases atrapados, con lo que fácilmente se pueden quedar burbujas en el vidrio cuando se enfría (10).

Otra importante desventaja de los granos finos en la materia prima es que tienen el riesgo de ser arrastrados por los flujos de gases dentro del horno, depositándose en los refractarios, ocasionando posteriormente problemas de escurrimientos o acumulación de material que pueden dañar seriamente este equipo en el largo plazo (10).

La especificación de granulometría para la arena en Grupo Vitro es que no debe exceder del 1.5% de granos mayores a 0.42 mm, y para los finos se puede aceptar hasta

7% de material debajo de 0.13 mm, pero no se acepta que contenga granos menores a 0.07 mm.

1.2.2.2. Fundentes

La sílice presenta un punto de fusión muy alto (1,725°C), lo cual representa un consumo energético muy costoso si se quisiera fundir directamente, además de requerir refractarios muy sofisticados para resistir estas temperaturas en los hornos. Para ayudar a la fusión de la sílice se utilizan materiales llamados fundentes, los cuales son modificadores de la red vítrea. Actúan abriendo enlaces Si-O-Si, con lo que el punto de fusión se reduce, pero afectando negativamente otras propiedades del vidrio, tales como su resistencia mecánica, resistencia a la humedad ambiental y estabilidad química en general, disminuyen su viscosidad e incrementan su tendencia a la desvitrificación (8).

De todos los fundentes, los óxidos de metales alcalinos son los que dan mejores resultados, y de éstos, es el de sodio el que más ampliamente se utiliza en la actualidad. Después de la sílice, el óxido de sodio es el componente de mayor porcentaje en la formulación del vidrio flotado, llegando alrededor del 14% (7).

1.2.2.2.1. Carbonato de sodio. El carbonato de sodio es la principal materia prima que aporta óxido de sodio al vidrio, en México se le conoce comúnmente como soda.

Se puede utilizar en su forma natural como trona ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o bien de fuente sintética, fabricada por medio del método Solvay, que consiste en el tratamiento del cloruro de sodio con amoníaco y bióxido de carbono para formar bicarbonato de sodio que posteriormente se somete a una calcinación (7).

1.2.2.2.2. Sulfato de Sodio. El sulfato de sodio se utiliza en la fabricación de vidrio principalmente debido a su función de afinante, pero también contribuye con una cantidad importante al óxido de sodio requerido como fundente. Normalmente se utiliza de 20 a 25% del total de Na_2O , y generalmente se consume de fuente sintética (9).

Debido al bajo costo del sulfato de sodio, se ha tratado de incrementar el porcentaje de su uso, y reemplazar parte de la soda, pero no se ha logrado ya que el sulfato es muy agresivo con el refractario del horno. En exceso, puede provocar burbujas y coloración amarillenta en el vidrio, además incrementa la contaminación atmosférica con SO_2 (9).

1.2.2.3. Estabilizantes.

Tal como su nombre lo indica, su función es estabilizar la red vítrea, confiriéndole al producto más estabilidad química y resistencia mecánica. Son indispensables para la fabricación de vidrios económicamente atractivos que cumplan los requerimientos de uso arquitectónico y automotriz (7). En seguida se mencionan los más importantes.

1.2.2.3.1. Óxido de calcio. En la formulación del vidrio comercial común, el óxido de calcio ocupa el tercer lugar en porcentaje en peso. Se agrega normalmente alrededor del 8-9% del total de la masa del vidrio. Actúa como estabilizante, pero también como fundente, ya que por una parte, modifica la red vítrea del SiO_2 , pero también su presencia aumenta la estabilidad química y mecánica del vidrio. Normalmente se utiliza en forma de caliza natural, siendo muy abundante en muchos países (7).

Es un material relativamente económico, y con buena consistencia en sus propiedades dentro del mismo yacimiento, sin requerir mayor preparación que

acondicionar su granulometría para poder utilizarla como materia prima para vidrio. En general sus contaminantes no representan problemas al proceso de vidrio flotado (7).

Una importante desventaja del óxido de calcio es que su presencia favorece la cristalización del vidrio fundido, por lo que se tiene que agregar a la red vítrea otro componente para que el vidrio fundido se “aleje” de las zonas de formación de ciertas fases cristalinas. El material más común para este uso es el óxido de magnesio (8).

1.2.2.3.2. Óxido de magnesio. El óxido de magnesio realiza prácticamente la misma función que el óxido de calcio, complementándose mutuamente para alejar a la mezcla vítrea de la cristalización, e igualmente con función tanto de estabilizante como de fundente. Este óxido ayuda para la formación de vidrios más estables, incrementa la viscosidad del vidrio y alarga el intervalo térmico de moldeabilidad. Normalmente se utiliza de 3.5 a 5% en el vidrio flotado. La materia prima más común para proveer óxido de magnesio es la dolomita, la cual es un mineral formado por carbonato de calcio y carbonato de magnesio (8).

1.2.2.3.3. Óxido de aluminio. El uso de alúmina en el vidrio incrementa su resistencia mecánica así como su estabilidad química, eleva su refractariedad y disminuye su coeficiente de dilatación térmica, mejorando por consiguiente su resistencia al choque térmico. También reduce la tendencia a la desvitrificación, aumenta la viscosidad, el intervalo de trabajabilidad del vidrio y eleva considerablemente su tensión superficial. Frecuentemente se utiliza de 1 a 2% en la fabricación de los vidrios más comunes (7).

1.2.2.4. Componentes secundarios.

Además de los componentes ya descritos, en los vidrios comunes se utilizan normalmente otros materiales en baja proporción, con fines muy diversos, principalmente como colorantes (hierro, cobalto, selenio, cromo, vanadio, etc.), decolorantes (cerio, níquel, cobalto, selenio, etc.), opacificantes (óxido de cerio) y afinantes; estos últimos se explican en la parte del horno (sección 1.2.3.3), siendo el más común es el sulfato de sodio, mencionado en la sección 1.2.2.2.2 (7, 9).

1.2.3 Vidrio flotado.

1.2.3.1 Las bases del proceso.

La fabricación de vidrio “flotado” básicamente consiste en verter un flujo continuo de vidrio fundido a un tanque con estaño líquido, en donde el primero flota sobre el metal y se forma al espesor y ancho deseado (10).

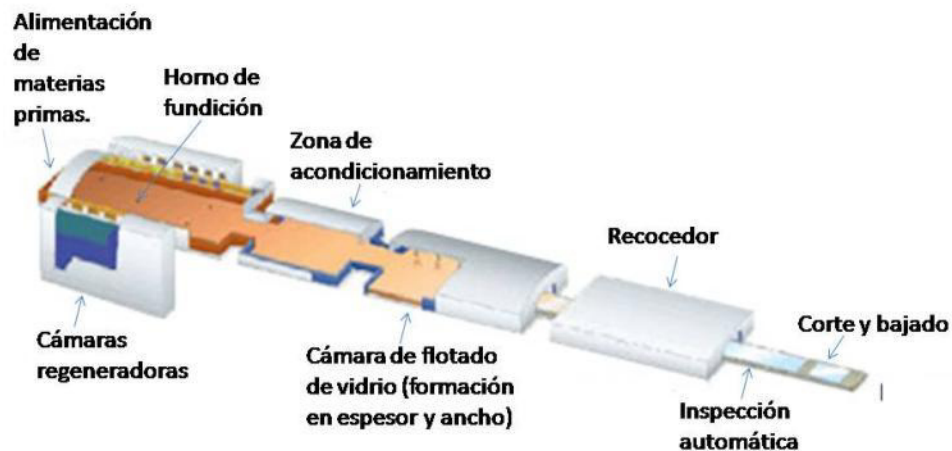


Figura 5, diagrama del proceso de fabricación de vidrio flotado.

Una línea típica funde unas 500 a 700 toneladas diarias de vidrio y consta básicamente de 5 secciones, mostradas en la figura 5:

- Preparación y alimentación de materias primas.
- Horno de fundición y acondicionamiento de vidrio
- Cámara de flotado.
- Recocedor.
- Corte y bajado de vidrio.

1.2.3.2 La preparación de materias primas.

Aquí se reciben los diferentes materiales que conforman el vidrio, se pesan las cantidades programadas de cada materia y se mezclan con agitadores de paleta para obtener un lote más homogéneo. Posteriormente la mezcla se transfiere por medio de bandas al horno de fundición, en donde se alimenta a una velocidad controlada.

1.2.3.3. El horno.

La mezcla de materias primas es transportada, normalmente por medio de bandas sinfín, a una tolva en la entrada del horno, en donde éstas se funden, alcanzando una temperatura máxima de aproximadamente 1,500°C.

Normalmente los hornos de fundición para vidrio flotado son tipo “regenerativo”, esto es porque tienen varios quemadores en ambos lados del horno, como se muestra en la figura 6, de manera que unos 15 a 20 minutos funcionan los de un lado y posteriormente se alternan para que funcionen los del otro lado (8). Los gases y vapores calientes que se generan durante la combustión en un lado, son dirigidos hacia el lado contrario, pasando a través de los regeneradores, que son cámaras que contienen un

“cuadriculado” de refractarios entre los que circulan estos gases, con lo que los primeros incrementa su temperatura, almacenando calor (8).



Figura 6. Vista de las flamas de los quemadores de un horno de vidrio flotado.

En el siguiente ciclo se encienden los quemadores del lado contrario, y el aire necesario para la combustión entra por la parte baja de estas cámaras regeneradoras recién calentadas, incrementando su temperatura al pasar entre este cuadriculado de refractario antes de entrar al horno, aprovechando así una alta cantidad de energía calorífica (8). Estos flujos son controlados por medio de compuertas que dirigen los gases y vapores hacia la chimenea. Dicho ciclo se representa en la figura 7.

Después de la zona de quemadores, se encuentra la zona de refinación, que es donde las burbujas de gas que tiene el vidrio fundido desaparecen, pudiendo ser porque: a) flotan hasta la superficie o b) se disuelven los gases otra vez en el vidrio. Estas burbujas, cuando permanecen en el vidrio como producto final, son defectos que frecuentemente provocan una lámina inaceptable, por lo que tiene que reciclarse.

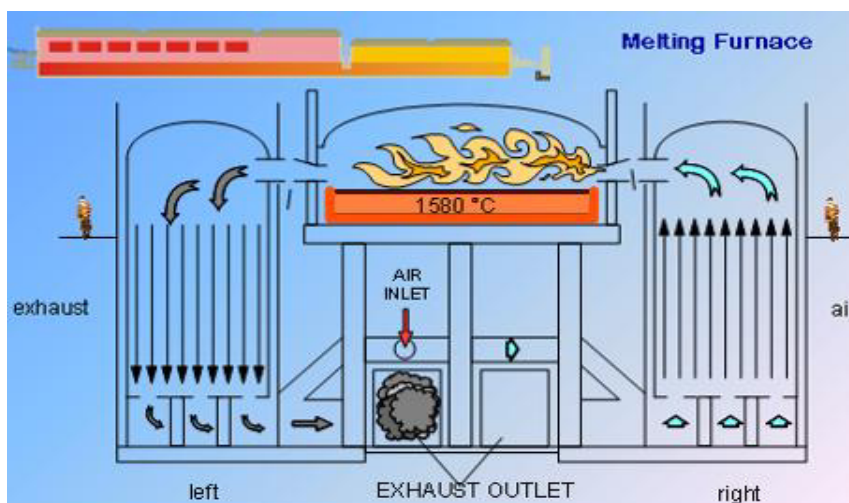


Figura 7. Esquema de un horno de vidrio flotado mostrando el flujo de los gases de combustión, incluyendo su paso por las cámaras regeneradoras (Pilkington 2000).

Para producir 1,000 Kg de vidrio, se requieren 1,215 Kg de materias primas, o sea que 215 Kg de gases escapan a la atmósfera por cada tonelada de vidrio fundido, siendo necesario que salgan del vidrio para tener buena calidad (10). Debido a la alta viscosidad del vidrio fundido, las burbujas pequeñas no pueden llegar a la superficie por sí solas, por ejemplo, una burbuja de 2 mm de diámetro subirá 10 cm en 4.3 minutos, pero una burbuja de 0.5 mm se tardará 1.1 horas en subir esta misma distancia (8).

Para solucionar el problema de las burbujas atrapadas en el vidrio, se utilizan “agentes afinantes” (también llamados “refinantes”), cuya función es generar altas cantidades de gases que son solubles en el vidrio, tales como O_2 , SO_3 , H_2O y H_2 . Estos gases solubles primeramente forman burbujas grandes que atrapan la mayor parte de las burbujas de otros gases insolubles, tales como N_2 , CO_2 , CO , COS , SO_2 y Ar , y debido a su gran tamaño, rápidamente salen a la superficie (10). Si estas burbujas de gases solubles son pequeñas y no alcanzan a llegar a la superficie, se pueden disolver en el vidrio cuando éste se enfría a aproximadamente $1,400^{\circ}C$ en la zona de refinación.

Al terminar la zona de refinación están los agitadores, que ayudan a homogenizar el vidrio, así como una bota formando una compuerta que restringe parcialmente el flujo de vidrio entre la zona de refinación y la zona de acondicionamiento, también llamada zona de trabajo, que es donde el vidrio se enfría a una temperatura entre 1,080 y 1,145°C, para pasar a la cámara de flotado.

1.2.3.4. La cámara de flotado (zona de formación).

La cámara de flotado (figura 8) es una estructura de acero recubierta en su interior con refractario, la cual está llena con una cama de 5 a 12 cm de estaño líquido. El vidrio fundido se vierte sobre el estaño, en donde flota para formar sus superficies planas. Los bordes del vidrio fundido se mueven controladamente con ayuda de varios pares de ruedas dentadas (máquinas atenuadoras), las cuales giran ininterrumpidamente en cierto ángulo, estirando los bordes para fabricar el vidrio delgado o bien empujando el vidrio hacia el centro para formar productos gruesos. El movimiento aplicado por las máquinas atenuadoras debe equilibrarse con la velocidad con la que el vidrio es estirado por los roles del recocedor, para formar un espesor lo más plano posible (8).

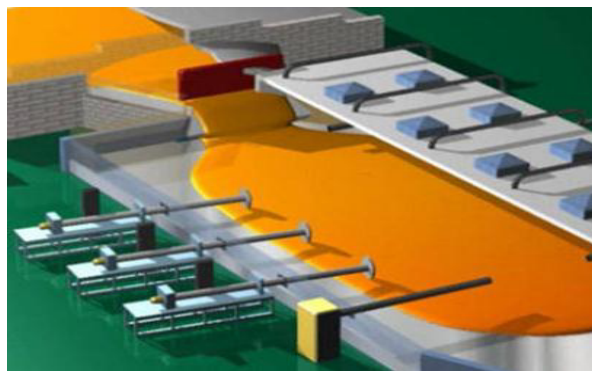


Figura 8. Corte mostrando el final de la zona de acondicionamiento, compuerta, máquinas atenuadoras y vidrio fluyendo en la primera parte de la cámara de flotado.

En la cámara de flotado se tienen además, medios para calentar o enfriar controladamente el listón de vidrio, y así formarlo con el espesor y ancho requeridos.

El estaño fundido reacciona rápidamente con el oxígeno, formando óxido de estaño, el cual provoca defectos en el vidrio, por esta razón la cámara de flotado está sellada casi herméticamente, y a su interior se alimentan típicamente 1,100-1,300 m³/h de nitrógeno para evitar el ingreso de aire. Este gas se mezcla con 6 a 9% de hidrógeno para que reaccione con el oxígeno, que principalmente proviene del mismo vidrio fundido, formando con esto vapor de agua, el cual es menos oxidante para el estaño (8).

Una cámara de flotado típica mide unos 60 metros de longitud, formando vidrio de 2 a 19 mm de espesor, con un ancho de 3 a 4 metros. Otra función muy importante de la cámara de flotado es enfriar el vidrio a 600-620°C para que el recocedor lo pueda recibir.

1.2.3.5. El recocedor.

La función del recocedor es enfriar controladamente el vidrio para que los esfuerzos internos del mismo no sean demasiado elevados, ya que si así sucediera, éste se rompería muy fácilmente y sería difícil cortar adecuadamente las láminas de vidrio (8).

El recocedor está construido como un túnel en varias secciones, con características diferentes cada una, ya que el enfriamiento del vidrio no es homogéneo en todo el intervalo de temperatura por el que pasa para llegar a estar “frío”. En su interior tiene rodillos aproximadamente cada 50 cm que giran ininterrumpidamente para transportar al vidrio durante su enfriamiento.

A temperaturas arriba de 540°C, el vidrio presenta un comportamiento plástico, es decir, no retiene esfuerzos en su estructura, por lo que es posible todavía moldearlo en este intervalo (8). A temperaturas menores a los 480°C el vidrio se comporta prácticamente como un sólido, de manera que si se deforma, tenderá a recuperar su forma original, o bien puede romperse si el esfuerzo es alto. Entre estas temperaturas (480 a 540°C) es que el vidrio se torna “rígido”, adquiriendo esfuerzos en su estructura, mismos que mantendrá mientras no sea cortado o roto. Este es el intervalo “de recocido”, durante el cual se aplica enfriamiento “lento”, a 25°C por minuto aproximadamente (8).

Debajo de 480°C el vidrio ya se puede enfriar más rápidamente, a unos 50°C por minuto mediante ductos de acero sobre el listón, por los cuales circula aire. Desde aproximadamente 400°C se le pueden aplicar corrientes de aire directamente al vidrio, pero todavía dentro del túnel del recocedor (8). A unos 245°C el vidrio sale del túnel y continúa su enfriamiento hasta llegar al sistema de inspección y corte.

1.2.3.6. La línea de corte y bajado del producto.

El vidrio es inspeccionado por un sistema automático que detecta los defectos y los marca si están fuera de especificación. Este segmento de vidrio es rechazado y reciclado.

También en esta sección del proceso están las “rayadoras”, que hacen girar discos de corte por la superficie del vidrio, formando una pequeña fractura recta y continua, en donde posteriormente se le aplicará una fuerza mecánica al vidrio y así se realizará el corte de cada lámina. Una vez teniendo las láminas cortadas sobre los rodillos, se empaacan en sus respectivos contenedores. Esta maniobra puede ser manual o por medio de robots.

1.3 Fluorescencia de Rayos X.

Cuando se expone un material a los rayos X, si tienen la energía adecuada, pueden provocar que un electrón sea removido de las capas de menor energía de un átomo, formando un ion positivo inestable. Para reducir esta inestabilidad, otro electrón de un orbital superior de mayor energía del mismo átomo ocupará el hueco en el orbital de menor nivel. El exceso de energía de este electrón será emitido al exterior en forma de rayos X secundarios o fluorescentes (11), como se puede observar en la figura 9.

La espectroscopia por fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica de análisis químico cualitativo y cuantitativo, utilizada para determinar la composición elemental de muestras sólidas o líquidas utilizando rayos X, que se hacen incidir en la superficie de la muestra mientras un detector mide la cantidad de fotones fluorescentes que son emitidos por ésta. El método es bastante preciso para muchas aplicaciones, rápido y no destructivo, y en general requiere poca preparación de muestra. La generación de los rayos X normalmente se realiza en un tubo de alto voltaje, aunque también se puede utilizar un material radioactivo o un ciclotrón (11, 12).

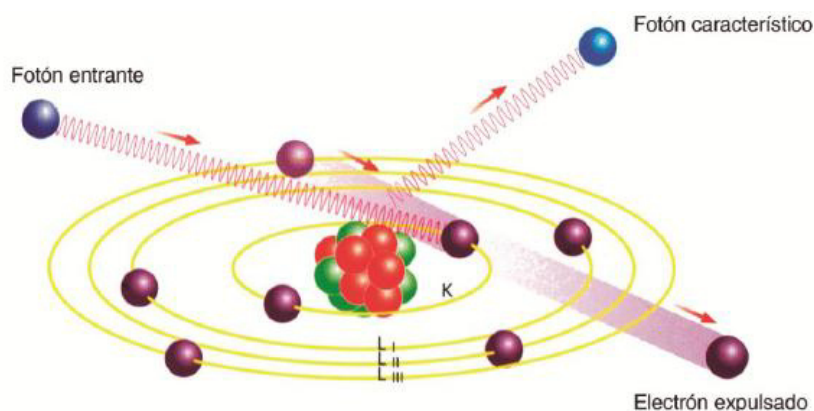


Figura 9. Producción de fluorescencia en un átomo (Bower 2010).

Existen varias combinaciones de niveles de energía de electrones removidos, y niveles de electrones que bajan su nivel para ocupar estos huecos; las combinaciones de longitudes de onda de estas energías forman un patrón característico para cada elemento, tal como si fuera una huella digital, con lo que es posible identificarlo por este medio (análisis cualitativo). Al medir las intensidades de las energías emitidas se puede calcular la concentración de cada elemento (análisis cuantitativo) (12).

1.4 Difracción de rayos X.

La difracción de rayos X o cristalografía de rayos X es una técnica de análisis cualitativo y cuantitativo que proporciona información sobre tipos de fases cristalinas, su estructura, grado de cristalinidad, cantidad de contenido amorfo, distancias interplanares, empaquetamientos, interacciones moleculares, ángulos de enlace, etc., siendo posible con esa información, identificar sólidos cristalinos, ya que cualquier sustancia de este tipo produce un patrón de difracción característico al analizarse con esta técnica. Este patrón debe compararse con otros diagramas de difracción existentes en bancos de datos para poder identificar la especie química, o bien compararla contra el patrón de una muestra conocida.

Una de las principales desventajas de esta técnica es que sólo es capaz de proporcionar información detallada de los cristales que existan en la muestra, por lo que no es de mucha utilidad para disoluciones, sistemas biológicos, amorfos o gases. En el caso de un material amorfo no aparecerá un patrón, únicamente aparecerá más ruido que en una muestra cristalina, además de algunos picos amplios. La intensidad de las líneas de difracción de una especie química dentro de una mezcla es proporcional a la cantidad

existente de esa especie en la muestra, con lo que es posible cuantificarla. También nos indica la forma mineralógica en que se encuentran las sustancias estructuradas, no sólo su composición elemental.

La técnica analítica consiste en hacer incidir un haz de rayos X a través de la muestra, este haz se escinde en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse para darnos información sobre la ubicación de los átomos en el cristal (13, 14).

El principio de funcionamiento del difractómetro de rayos X consiste en analizar una muestra que normalmente está en forma de polvo menor a 120 micrómetros, la cual se coloca sobre un porta muestras. En la periferia, en los lados opuestos, se localiza el tubo de rayos X y un detector. Durante el análisis, la fuente de rayos X permanece fija mientras el porta-muestras está girando sobre su propio eje, con lo que el ángulo de incidencia de los rayos X respecto a la muestra está variando. Simultáneamente, el detector también está rotando sobre la periferia del círculo del difractómetro en un ángulo 2θ siguiendo el mismo giro que el porta-muestras. El detector manda las señales para ser procesadas por el equipo, en donde se obtiene una gráfica (difractograma o patrón de difracción), en la cual se puede ver una línea de ruido, así como picos de diferentes alturas, localizados en varias posiciones (13).

En la figura 10 se puede apreciar un ejemplo muy claro del tipo de información que proporciona esta técnica. Tenemos el caso de la sílice en 5 formas diferentes, es exactamente la misma fórmula química: SiO_2 , pero su estructura cristalina cambia, por lo que también son diferentes los espectros de difracción, ya que como se ha mencionado, son específicos para cada cristal. En la parte superior se incluye el difractograma de la

sílice en estado vítreo, la cual no tiene un patrón de difracción específico, sólo un pico muy amplio, con mucho ruido, confirmando que no presenta estructura cristalina. Los espectros de la cristobalita y del cuarzo sí presentan picos bien definidos, por lo que pueden compararse con difractogramas de bases de datos para su identificación (13).

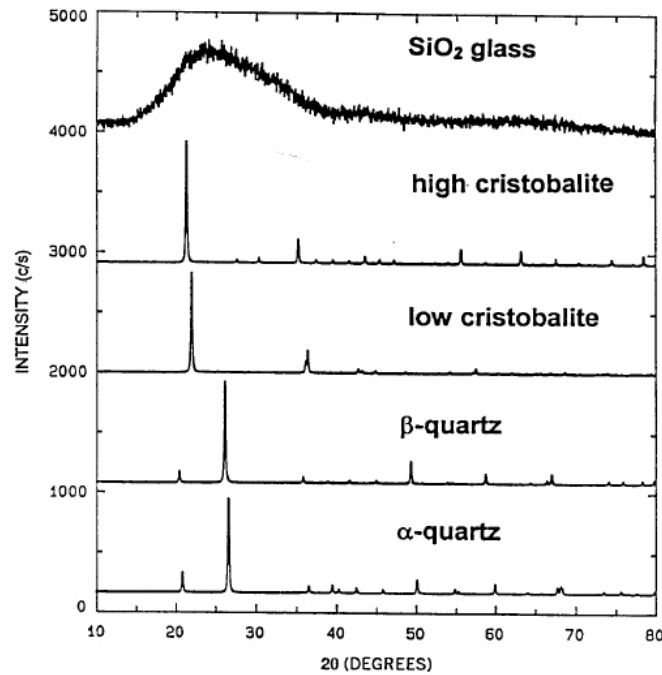


Figura 10. Difractogramas de la sílice en 5 de sus diferentes estructuras (Jenkins 1996)

1.5 Aglomeración de material.

1.5.1 Teoría de la pelletización.

Los métodos de aglomeración se pueden clasificar en tres categorías (16):

- a) crecimiento de pellets por rodamiento/agitación;
- b) aglomeración por presión y
- c) otros métodos (sprays, congelación, etc).

Las palabras “pellet” o “pelet” no están aceptadas por la Real Academia Española, los términos más adecuados serían tal vez gránulo o material granulado, sin embargo en

el ámbito industrial el término más común en México es “pellet” (o “pelet”), para referirse a un aglomerado de partículas o gránulo con forma esférica, con una porosidad mayor que las partículas que lo componen. En este escrito se utilizará esta terminología.

Hay materiales que son capaces de formar pellets sin utilizar ninguna sustancia líquida como aglomerante, a esto se le llama “pelletización por vía seca”. Existen otros materiales que necesitan la ayuda de un agente aglutinante líquido, normalmente agua o soluciones acuosas para poder aglomerarse, a este tipo se le llama “pelletización por vía húmeda”, el cual es el proceso más común actualmente.

La unión entre las partículas de los pellets es básicamente debida a la tensión superficial en el caso de vía húmeda, mientras que en el caso de la pelletización por vía seca, la aglomeración parece ser gracias a fuerzas de naturaleza electrostática (17). A los pellets todavía húmedos se llaman “pellets verdes”, los cuales normalmente requieren secarse para poder manipularlos. También pueden pre-cocerse en hornos para incrementar su dureza y porosidad si así se requiere.

El proceso de pelletización por vía húmeda consta de tres fases principales:

- a) Preparación de la materia prima con la granulometría adecuada.
- b) Fabricación de los pellets verdes
- c) Secado de los pellets, y en algunos casos, pre-cocido en horno.

1.5.2 Efecto del agua en la pelletización.

Se pueden distinguir cuatro etapas de la hidratación durante el proceso de formación de los pellets verdes, como se muestra en la figura 11:

- a) Estado pendular. El agua está presente sólo en los puntos de contacto de los granos, sirviendo de puente entre las partículas. El número y calidad de puntos es función del tamaño y geometría del grano, así como de la cantidad de agua.
- b) Estado funicular. Es cuando el agua llena algunos de los poros.
- c) Estado capilar. Prácticamente todos los poros están cubiertos por agua, pero sin haber exceso de líquido.
- d) Estado de goteo. Ocurre cuando hay un exceso de líquido (17, 18).

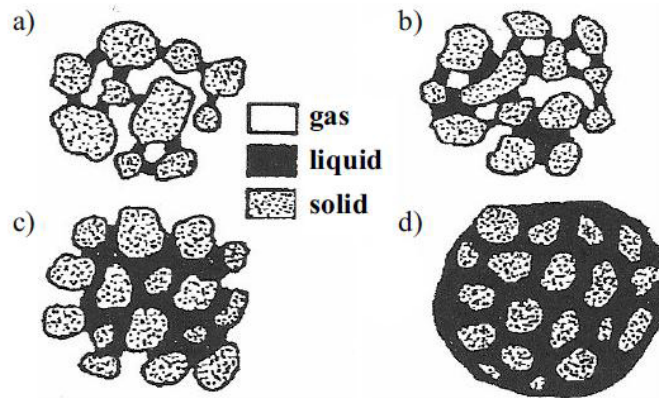


Figura 11. Estados de la formación de los pellets (Newitt 1958)

La cantidad de líquido es muy importante para la formación de pellets; cada material tiene una cantidad óptima de agua para su aglomeración, dependiendo básicamente de la capacidad del material para mantenerla adherida a su superficie (características hidrofílicas) y de su granulometría. Esta cantidad óptima es la necesaria para formar una capa por ejemplo de 0.1 a 0.2 micras, lo cual puede llenar un 95% de la porosidad de las partículas. Si se excede cierto límite de agua, aunque sea un poco, repentinamente los pellets se vuelven una masa lodosa (19,20).

Con esta cantidad óptima de agua, se formará un menisco en cada poro; si la cantidad de agua es baja, habrá mayor presencia de aire, reduciendo el efecto capilar, mientras que si hay un exceso de líquido, será una capa tan gruesa que igualmente reducirá el efecto capilar, e incrementará de manera excesiva su plasticidad, dificultando la formación del pellet. El tamaño de partícula también tiene fuerte influencia en la formación de los pellets, así como en sus propiedades.

1.5.3 Mecanismo de crecimiento de los pellets.

Se pueden distinguir varias etapas durante el crecimiento de los pellets. En la primera, se forma un núcleo con un ligero exceso de agua, que sirve para comenzar el proceso. Cuando dos de estos núcleos entran en colisión, el exceso de agua permite la cohesión de ambos gránulos, reduciendo su área total y por lo tanto, su energía superficial, con lo que se forma un aglomerado más estable energéticamente. En la segunda etapa, o periodo de transición, los granos están agrupados estrechamente gracias a la fuerza capilar, haciendo que el agua migre hacia el exterior, con lo que el núcleo sigue cubierto por un pequeño exceso de agua. En la tercera etapa, o de crecimiento, continúa un proceso similar al descrito en la etapa anterior; mientras el pequeño pellet está en movimiento, puede ir creciendo mediante la incorporación de otros núcleos o pellets (crecimiento por asimilación), además de captar granos de material “fresco” (crecimiento por capas) o fragmentos de pellets que se van deshaciendo (17).

Durante la formación de pellets, simultáneamente se van rompiendo cierto número de ellos debido a los choques con otras partículas. También puede ocurrir la pérdida de material de un pellet debido a la abrasión por su fricción con otros pellets o con las

superficies de la maquinaria, lo cual provoca una reducción del tamaño del pellet. Estos mecanismos se pueden observar en la figura 12.

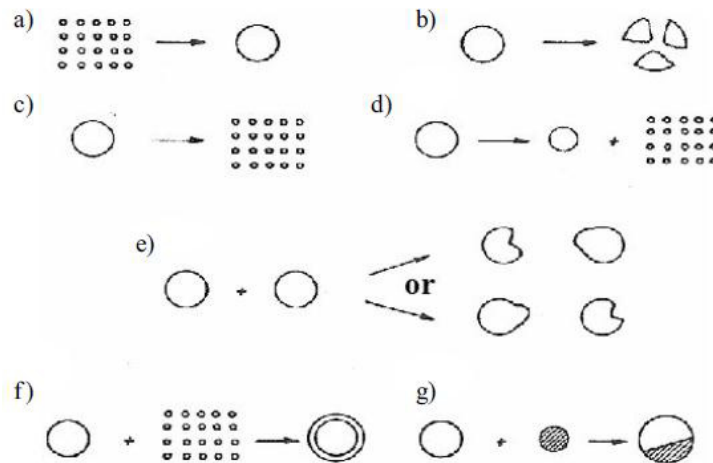


Figura 12 Mecanismos de formación y cambios en los pellets durante el proceso de aglomeración a) formación del núcleo; b) rompimiento en núcleos más pequeños c) Desintegración del pellet en granos individuales; d) abrasión; e) transferencia de granos de un pellet a otro; f) crecimiento por capas; g) asimilación (Kaminska 2011)

1.5.4 Equipos para pelletizado.

Para la fabricación de pellets por vía húmeda se requieren choques entre las partículas para promover su aglomeración, aunque tampoco es ventajosa una agitación demasiado vigorosa, ya que destruiría los pellets prematuramente. Existen en el mercado varios tipos de equipos para pelletizado por vía húmeda, los más comunes son los tambores y los discos (21), los cuales se explicarán a continuación.

1.5.4.1 Discos pelletizadores.

Este equipo consiste básicamente de un plato con paredes altas, que gira sobre su eje de simetría con una cierta inclinación respecto a la horizontal, pudiendo variarse este

ángulo, así como su velocidad de rotación. En este disco se introducen los materiales sólidos para pelletizarse, así como el aglomerante. Este último se dosifica sobre el material durante el movimiento del disco para repartirlo de manera más uniforme para mojar la mayor cantidad posible de granos, evitando encharcamientos (21).

Este equipo generalmente cuenta con unas paletas suspendidas de un soporte fijo, de manera que tocan la paredes y/o piso del disco para desprender el material que se quede adherido al mismo, e incrementando además la fricción entre el disco y el material. La posición del punto de alimentación de material, así como del aglutinante, tiene efecto en la estructura y tamaño de los pellets (21).

Tanto los discos como los tambores pueden utilizarse para procesos continuos. En el caso de los discos, los pellets son naturalmente segregados de acuerdo a su tamaño, de manera que los más grandes tienden a ocupar las posiciones más altas, llegando a desbordarse del plato al alcanzar ciertas dimensiones, mientras que los pellets pequeños se quedan más abajo y tienen más tiempo de crecer. La ventaja de esto es que evita la necesidad de cribar los pellets formados (22). En la figura 13 se muestra este equipo.

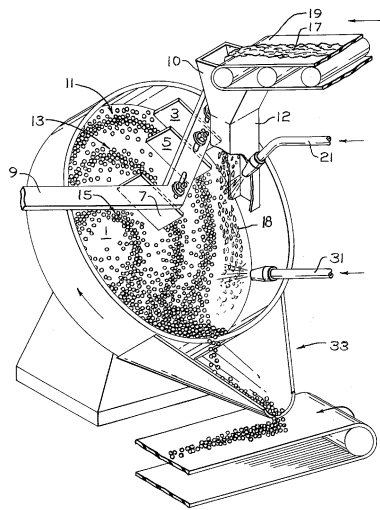


Fig 13. Producción continua de pellets en disco. Los más grandes rebosan (Cooper1977)

El ángulo del disco está relacionado con el tamaño del pellet formado, de manera que mientras mayor sea la inclinación, menor será el tamaño del aglomerado, ya que en este caso la fricción entre el polvo y el disco se hace más baja y más bien tiende a caer en lugar de rodar. El ángulo útil de este proceso normalmente es entre 45 y 70° (23).

1.5.4.2 Tambores pelletizadores.

Básicamente un tambor pelletizador es un cilindro abierto por ambos lados, el cual gira sobre su eje, con una ligera inclinación respecto a la horizontal. Está equipado con sistema para alimentación de los polvos, espreas para alimentar agua y rasquetas para evitar que el material se quede adherido al tambor, como se muestra en la figura 14 (21).

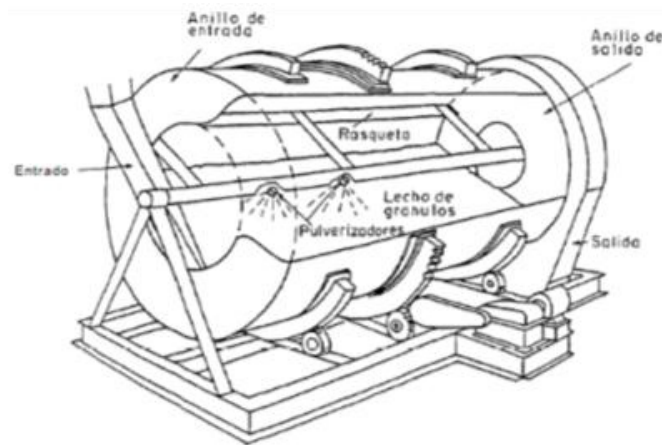


Figura 14. Tambor pelletizador (Vargas, 2014).

El agua es aplicada sobre los sólidos en el primer tercio del tambor para que los gránulos tengan oportunidad de crecer durante su movimiento dentro del cilindro. Las rasquetas desprenden de la pared del tambor la mayor parte del material adherido, pero

dejan una delgada capa de éste con objeto de aumentar la fricción entre las paredes y el material, mejorando de este modo la acción pelletizadora.

Si la velocidad del tambor es demasiado lenta, no se favorece la rotación del material, y sólo se desliza sin aglomerarse, pero si la velocidad es muy alta, el material se queda pegado a la pared por mucho tiempo debido a la acción de la fuerza centrífuga, hasta que cae por efecto de la fuerza de gravedad, con lo que tampoco se favorece la pelletización. Una desventaja del tambor respecto al disco, es que en el primero, los pellets no son segregados por su tamaño, por lo que posiblemente se requiera una etapa de cribado posterior a la pelletización (21).

1.5.4.3. Secado y endurecimiento de los pellets.

La última etapa de la producción de los pellets es el secado y endurecimiento, esto con la finalidad de incrementar su resistencia mecánica, así como conferirle propiedades particulares en algunos casos, por ejemplo porosidad o estructura cristalina específicas.

Los pellets verdes, cuando se aglomeran sólo con agua, normalmente bajan considerablemente su resistencia al secarse, ya que la fuerza que mantiene sus granos unidos es principalmente la tensión superficial, por lo que normalmente es necesario un endurecimiento para formar pellets útiles.

Los métodos de endurecimiento son de dos tipos: a baja temperatura y a alta temperatura. La primera implica el uso de aditivos sólidos o líquidos que se mezclan con el material a aglomerar, reaccionando químicamente para incrementar la resistencia del pellet. Para la segunda, también llamada endurecimiento térmico o piroconsolidación, se requiere el uso de un horno para calentar los pellets a 900-1,100°C y así producir puentes

de unión por recristalización, o bien pequeñas fusiones parciales entre granos. Las uniones así logradas son muy fuertes (21).

1.5.5 Caracterización de los pellets.

Existen varias pruebas para caracterizar los pellets, algunas de ellas están estandarizadas, principalmente para la industria del acero, en particular para pellets de hierro; otras no están estandarizadas pero son de uso muy amplio en la industria.

No se encontró referencia de pruebas estándar para pellets de vidrio, sin embargo, se pueden adoptar algunas de las siguientes pruebas para nuestros propósitos.

1.5.5.1 Tamaño del pellet.

Aunque no hay un tamaño estándar o aceptado como óptimo, ya que depende del tipo de material y uso, se estima que un pellet adecuado para la fabricación de vidrio, es de 1.4 a 12 mm de diámetro (25). La evaluación de esta variable se realiza normalmente por medio de cribas.

1.5.5.2 Humedad.

Para evaluar la humedad de los pellets en verde se secan por ejemplo 100 gr de éstos en estufa a 110°C durante 4 horas y se calcula el % de humedad mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ humedad} = (PMI - PMF) * 100 / PMI \quad (1)$$

Donde:

PMI = Peso de muestra inicial

PMF = Peso de muestra final.

En la fabricación de vidrio flotado se utiliza normalmente una humedad entre 4 y 5% en peso en la mezcla de materias primas antes de entrar al horno (8).

1.5.5.3 Resistencia a la compresión.

Durante su manejo y almacenamiento, es inevitable que los pellets estén unos sobre otros durante algún tiempo, por lo que es necesario que tengan cierta resistencia a la compresión. Para realizar la evaluación se recomienda el uso de una máquina universal, midiendo la fuerza que puede resistir cada pellet antes de romperse (21).

Alternativamente se puede colocar sobre un pellet una masa de acero de un peso fijo, por ejemplo un cilindro de 1 a 2 kg, y reportar el resultado como “pasa” o “no pasa”.

Otra opción, que proporciona más información, aunque la medición tiene menos confiabilidad, es el mismo sistema del párrafo anterior, pero se requiere hacerlo sobre una balanza; se coloca el pellet sobre ésta, y el cilindro metálico sobre él. Si aguanta el peso sin romperse, se comienza a presionar lentamente el pellet hasta que se rompa. Se registra este peso y se hace un promedio de 10 lecturas.

1.5.5.4. Resistencia a las caídas.

Para evaluar su resistencia, existe una sencilla prueba que consiste en dejar caer varias veces un pellet de 9.5 a 12.5 mm de diámetro desde una altura de 46 cm sobre una placa de acero antes de romperse o presentar grietas visibles (21). En algunos procesos industriales se toma esta prueba como la única referencia para la aceptación de los

pellets, ya que es muy sencilla, rápida, no requiere inversión en equipo y es suficientemente severa para muchos propósitos.

1.5.6 Uso de material aglomerado en la fabricación de vidrio.

El uso de material pelletizado, en la fabricación de vidrio flotado, conlleva importantes beneficios, tal como afirma Rongen y equipo (24), los principales son:

- Fusión más rápida y con menor consumo energético
- Mejor calidad del vidrio, al ser más homogénea la mezcla de fundición.
- No hay segregación de las diferentes materias primas.
- Menor “carry over” (partículas muy pequeñas que son arrastradas por los flujos de gases dentro del horno, depositándose en el refractario y provocando escurrimientos o acumulación de material, con los consecuentes problemas de defectos en el producto).
- Menor emisión de polvos a la atmósfera.
- Posible uso de precalentamiento de materias primas antes de entrar al horno.

Igualmente, el uso de pellets presenta algunas desventajas a considerar:

- Mayor costo de operación.
- El tener material aglomerado en cierta proporción de materias primas, le resta flexibilidad a la operación en caso de cambios de fórmula.
- Se requiere agregar aglomerantes para formar los pellets, mismos que se tienen que considerar en la formulación del vidrio.
- Los pellets en su fabricación contienen típicamente de 7 a 14% de agua, misma que requiere energía para evaporarse.

1.6 Objetivos e hipótesis.

1.6.1 Objetivo General.

Determinar los tratamientos necesarios para que los desechos sílicos de la planta geotérmica de Cerro Prieto se puedan utilizar como materia prima en la fabricación de vidrio flotado.

1.6.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar los desechos sílicos de la planta geotérmica de Cerro Prieto.
- Determinar el proceso de purificación requerido para que la composición química del material sílico sea aceptable para la fabricación de vidrio, implica análisis químico después de cada etapa de lavado.
- Desarrollar el proceso de aglomeración del material sílico a nivel laboratorio, determinando los valores adecuados de las variables involucradas.
- Evaluar porcentaje de pelletización, dureza, humedad, resistencia a la vibración y a las caídas de los aglomerados obtenidos.
- Fusión del material aglomerado para fabricar vidrio a nivel laboratorio y evaluar su apariencia.

1.6.3 Hipótesis.

El desecho de la planta geotérmica de Cerro Prieto se puede procesar para convertirlo en una materia prima de bajo costo para la fabricación de vidrio flotado.

CAPITULO 2.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

En este capítulo se presenta la información detallada de cada una de las pruebas realizadas en este proyecto, así como características de los materiales y equipos utilizados durante los mismos. Con esta información se puede reproducir la parte experimental e inclusive modificarla en eventos posteriores.

2.1 Materiales.

Se utilizaron los siguientes materiales en el desarrollo de este proyecto:

- Silicato de sodio industrial tipo “N”, del proveedor “Grupo Pochteca”, con 8.9% de Na_2O y 28.7% de SiO_2 en solución acuosa, densidad 1.38 g/ml
- Hidróxido de sodio en hojuelas, marca Merck, grado RA.
- Muestras sólidas de 2 yacimientos diferentes de la planta de Cerro Prieto de desecho geotérmico (en lo sucesivo se le denominará “DG”).
 - La muestra DG #1 (aproximadamente 5 Kg), pulverizada.
 - La muestra DG #2 (aproximadamente 14 Kg), en forma de piedras hasta de unos 10 cm de diámetro; se molió en mortero antes de utilizarla.
- Materias primas del proceso de vidrio flotado. Estos materiales se utilizaron para elaborar una mezcla para los experimentos de pelletización. Algunos de sus datos se encuentran en la tabla II.

Tabla II. Composición de las materias primas utilizadas para la pelletización.

Material	Lote	Proveedor	Composición (%)						
			SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
Arena de sílice.	20104463	Grupo MP	98.51	0.03	0.02	0.23	0.01	0.03	0.59
Dolomita	Rem.# 1031	Apaxco	0.27	33.39	0.03		19.13		0.11
Soda	Vagón CRDX-13052	Ansac	Na ₂ CO ₃ : 99.75%. Mín 99.2%						
Sulfato de sodio	REM.#90137-38	Magnelec	Na ₂ SO ₄ 99.14%, Mín 98.5%						
Carbón.	Q615062055	Q.R.Y minerales	Sin contaminantes, composición N/A.						

2.2 Descripción del equipo experimental.

El equipo utilizado en el presente proyecto se encuentra en las instalaciones de Vidrio Plano de México, planta García, que es donde se realizó la parte experimental, excepto el aparato de difracción de rayos X, el cual está en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (ver tabla III).

Tabla III. Equipo utilizado en la parte experimental.

Equipo	Características.
Balanza analítica	A & D, modelo HF 200G.
Balanza	Ohaus, modelo scout pro 2000 g
Ro-tap	Tyler RX-29
Serie de mallas (tamices o cribas)	Marca Tyler, números 12, 18, 30, 40, 70, 100, 120 y 200 (mesh)
Mufla de laboratorio	Thermo Scientific, modelo thermolyne.
Estufa de laboratorio	GCA Precision.
Peletizadora	Marca Buehler, acondicionada. Disco de 27 cm de diámetro y 7 cm de altura.
Espectrómetro de fluorescencia de rayos X	Panalytical, modelo Epsilon 3 XL, ED
Medidor de radiación portátil	SE International, modelo Inspector.
Microscopio tipo estéreo	Marca Ziess, modelo Stemi 2000-C
Molino	Herzog HSM 50, carburo de tungsteno
Prensa de laboratorio	Specac, modelo Atlas 25
Difractómetro de rayos X	Marca Bruker, modelo D8, Advance.

2.3 Preparación inicial de las muestras.

Debido a que el material de estudio se envió de Cerro Prieto tal cual estaba en los yacimientos, fue necesario un tratamiento en el laboratorio previamente a su utilización en la secuencia experimental. La muestra DG #1 llegó pulverizada, así que se utilizó tal cual estaba, pero la muestra DG #2 eran piedras de diversos tamaños, hasta de unos 10 cm de diámetro, como se aprecia en la figura 15.

Primeramente se rompieron todas las piedras hasta un máximo de aproximadamente 15 mm, posteriormente se tomó una muestra de 2 Kg para las pruebas iniciales, seleccionándola con cuarteador tipo Jones. Se secó durante una noche en estufa a 110°C, se molió en mortero de porcelana y se cribó con malla #5 a un tamaño de partícula máximo de 4 mm. En una segunda etapa se molió otra vez la muestra #2 y se cribó con malla #18 para obtener material con tamaño inferior a 1 mm.



Figura 15. Muestra #2 de DG antes de molerla.

2.4 Lavado del desecho geotérmico.

Para retirar la mayor parte de los contaminantes de las muestras recibidas de Cerro Prieto, se decidió realizar pruebas de lavado con agua. Se colocaron 300 g de DG en un vaso de precipitados de 1,000 ml, se le agregaron 600 ml de agua deionizada templada (aproximadamente a 22°C), se agitó en parrilla con barra magnética a velocidad media durante 5 minutos y se dejó reposar durante 20 minutos (26).

Después de este tiempo, se decantó el líquido. Se tomó una muestra de 10 g del sólido lavado, se colocó en un vidrio de reloj y se secó en estufa a 110°C durante 3 horas. Estas muestras se analizaron posteriormente en el espectrómetro de fluorescencia de rayos X para conocer su composición química y evaluar la efectividad del proceso de lavado. Estos pasos se repitieron durante varias ocasiones.

En los experimentos #2, 3 y 5 se realizó la misma secuencia de lavado, pero utilizando agua precalentada a 80 +- 10°C en lugar de agua templada, para evaluar con cuál de los dos tratamientos era más efectivo el proceso de lavado. Esta actividad se realizó para ambas muestras de DG.

2.5 Granulometría.

Para poder emplearse en la fabricación de vidrio flotado, el material sílico debe cumplir con un máximo de 1.5% de partículas mayores a 0.40 mm, y no debe contener partículas menores a 0.07mm, así que se llevaron a cabo pruebas de granulometría. Se preparó la siguiente serie de mallas: números 12, 18, 30, 40, 70, 100, 120 y 200

ordenadas por tamaño, siendo la superior la más abierta. En la parte inferior se colocó el plato colector.

Para cada evaluación granulométrica se utilizaron aproximadamente 100 g de material y se colocaron en la malla superior.

Se instaló la pila de mallas con la muestra en el Ro-tap y se hizo trabajar durante 10 minutos. Después de este lapso, se pesó el material retenido en cada una de las mallas.

Cuando se realizó la evaluación granulométrica de los pellets, para evitar su daño prematuro, el cribado se hizo manualmente sin el equipo Ro-tap; se tomaron las mallas #4 y #12, la más abierta se colocó arriba, y en la parte inferior se colocó una charola para recolectar los finos.

Se vació la muestra en la malla #4 y se agitó durante aproximadamente 20 segundos. El porcentaje retenido tanto para el cribado manual como con el Ro-tap, se calculó utilizando las fórmulas siguientes.

$$\% \text{ Retenido} = (A/W) \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Pasa} = (W - (A + B)) \times 100 / W \quad (3)$$

Donde:

A = Peso retenido en el tamiz indicado

B = Peso retenido en los tamices superiores del indicado

W = Peso de la muestra total

2.6 Pérdidas por ignición.

Para determinar la cantidad de material que se pierde antes de llegar a temperaturas de fusión de vidrio, se realizan pruebas de pérdidas por ignición. Para ello

se pusieron a secar aproximadamente 10 g de cada una de las muestras de DG en la estufa a 110°C durante 3 horas, posteriormente se dejaron enfriar en desecador.

Se metió un crisol de porcelana a la estufa a 950°C durante 15 minutos, se sacó después de este tiempo y se dejó enfriar dentro de un desecador.

Una vez frío, se pesó el crisol vacío en la balanza analítica, registrando su peso hasta 0.1 mg. En este mismo crisol se pesó aproximadamente 1 g de muestra, igualmente registrando hasta 0.1 mg.

Se calcinó en la mufla a 950°C durante 3 horas y posteriormente se dejó enfriar en desecador. Se pesó el crisol con la muestra y se calcularon las pérdidas por ignición (PPI) con la siguiente fórmula:

$$PPI = (PCI + PMI - PCMF) * 100 / PMI \quad (4)$$

Donde:

PCI = Peso de crisol inicial

PMI = Peso de muestra inicial

PCMF = Peso de crisol con muestra final.

2.7 Pelletización del desecho geotérmico.

Debido a que las muestras de DG presentan un alto porcentaje de material de bajo tamaño de partícula, se hizo necesario incluir un proceso de aglomeración, así que se llevó a cabo el siguiente procedimiento para realizar las pruebas de pelletización:

a) Se lavaron con agua templada ambas muestras de DG y se secaron en la estufa a 110°C durante una noche.

- b) Se mezclaron ambos materiales para realizar las pruebas de pelletizado, aproximadamente 800 g de muestra #1 y 2.4 Kg de muestra #2.
- c) Se pesaron y se mezclaron entre sí las materias primas: dolomita, soda, sulfato de sodio y carbón, en las cantidades mostradas en la tabla IV.
- d) El material sílico (arena + DG) se pesó y se colocó en una charola de acero. Con una botella con rociador se agregó el agua estipulada en cada experimento (ver apartado 2.8 “diseño de experimentos”), mezclando manualmente.
- e) Se agregaron las restantes materias primas sólidas (soda, sulfato de sodio, dolomita y carbón), previamente pesadas. Se mezcló aproximadamente 1 minuto el material sílico húmedo con los demás materiales.
- f) Esta mezcla se colocó en el disco de la pelletizadora.
- g) Se ajustó el ángulo del plato a 50°.
- h) Se encendió la pelletizadora a 30 RPM y se agregó poco a poco el aglomerante con una botella con rociador, esparciéndolo sobre el material cuando éste iba cayendo. La cantidad de aglomerante se especifica en el apartado 3.8 “diseño de experimentos”.
- i) Con una espátula se retiró constantemente el material de la esquina superior del disco, para favorecer su aglomeración en pellets, tal como se muestra en la figura 30 a.
- j) Se dejó aglomerar el material durante 3-4 minutos para obtener los pellets (mostrados en la figura 16 b).
- k) Los pellets se sacaron del plato y se pesaron.
- l) Se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas.

m) Se volvieron a pesar después de este periodo y se metieron a secar completamente en estufa a 121°C durante 4 horas.

n) Se dejaron enfriar y se volvieron a pesar para calcular su porcentaje de humedad.



Figura 16. Pelletizadora en operación (a) y con pellets (b).

Se realizaron varias pruebas de pelletizado utilizando como vitrificante arena de sílice y DG (lavado) en varias proporciones. El detalle de las cantidades utilizadas se encuentra en el apartado 2.8 “diseño de experimentos”. Las demás materias primas siempre se agregaron en las mismas cantidades de acuerdo con la tabla IV:

TABLA IV. Mezcla de materias primas utilizadas en las pruebas.

	Peso (gr)
Desecho Geotérmico o arena	29.8
Carbonato de sodio (soda)	9.3
Dolomita	8.9
Sulfato de Sodio	0.3
Carbón	0.01
Total de mezcla	50.0

2.8 Diseño de experimentos.

Para encontrar las mejores variables para la pelletización con el menor número de eventos, se decidió la utilización de un diseño de experimentos tipo Taguchi en 2 bloques con 3 factores y 3 niveles. Se eligieron las siguientes variables y rangos para el diseño (21), como también se muestra en las tablas V y VI:

- Bloque 1: Ligantes agua y NaOH en solución acuosa al 25% en peso.
- Bloque2: Ligantes agua y solución de silicato de sodio tipo N con agua 1:1.
- Tamaño de muestra: 50 g de materias primas sólidas para ambos bloques.
- Cantidad de DG: 1.5, 3 y 4.5 g
- Cantidad de hidróxido de sodio (bloque 1): 4, 7 y 11 ml
- Cantidad de silicato de sodio (bloque 2): 5, 10 y 15 ml
- Cantidad de agua bloque 1 extra, aparte del agua del NaOH Aq: 9, 10 y 11 ml.
- Cantidad de agua bloque 2: la suficiente para completar 14, 16 y 18 ml

Tabla V. Descripción de las unidades experimentales, bloque 1.

No.	Desecho geotérmico (g)	Solución acuosa de NaOH al 25% (ml)	Agua (ml)
1	1.5	4	9
2	1.5	7	10
3	1.5	11	11
4	3	4	11
5	3	7	9
6	3	11	10
7	4.5	4	10
8	4.5	7	11
9	4.5	11	9

Tabla VI. Descripción de las unidades experimentales, bloque 2.

No.	Desecho geotérmico (g)	Solución acuosa de Silicato de sodio al 50% (ml)	Agua total (ml)
1	1.5	5	14
2	1.5	10	16
3	1.5	15	18
4	3	5	18
5	3	10	14
6	3	15	16
7	4.5	5	16
8	4.5	10	18
9	4.5	14	14

2.9 Caracterización de los pellets.

Una vez que los pellets se secaron en la estufa, se caracterizaron mediante las siguientes pruebas: Granulometría (descrita en la sección 2.5), Prueba de vibración, % de humedad y resistencia a la presión estática, como se describe a continuación.

2.9.1 Prueba de vibración.

Para efectos de evaluar la resistencia mecánica de los pellets durante su trayecto en una banda transportadora, se decidió realizar pruebas de resistencia a la vibración. En esta prueba se utilizaron pellets mayores a 4.76 mm (cribados con malla #4). Los resultados de esta evaluación nos indican el grado de desgaste que tendrán los pellets

durante su transporte en el proceso industrial. Se pesaron y se registró su peso (*PPI*). Posteriormente se colocaron en el plato de la máquina Ro-tap.

Se hizo funcionar durante 5 minutos, se volvió a cribar con malla #4, se pesó el material retenido (*PPF*) y se calculó el porcentaje de desgaste con la siguiente fórmula.

$$\% \text{ desgaste} = (PPI - PPF) * 100 / PPI \quad (5)$$

Donde:

PPI = Peso de pellets inicial

PPF = Peso de pellets final.

2.9.2 Determinación del % de humedad.

La humedad en las materias primas es un parámetro importante para la reducción del consumo energético en el proceso de fabricación de vidrio, ya que el agua consume energía para su evaporación dentro del horno. Para evaluar la humedad de los pellets en verde, se pesaron inmediatamente después de formados y se registró este peso (*PMI*), se secaron los pellets producidos en cada uno de los experimentos (entre 57 y 67 g) en la estufa a 110°C durante 4 horas. Se pesaron, se registró el peso (*PMF*) y se calculó el porcentaje de humedad mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ humedad} = (PMI - PMF) * 100 / PMI \quad (6)$$

Donde:

PMI = Peso de muestra inicial

PMF = Peso de muestra final.

2.9.3 Resistencia a la compresión.

Inevitablemente los pellets estarán unos sobre otros durante su fabricación, manejo y almacenaje, por lo que requieren soportar esfuerzos de compresión, para evaluarlos se puso un pellet sobre la balanza Ohaus, se colocó poco a poco sobre él una pieza de acero con un peso de 1,030 g. En el caso de los pellets que soportaron este peso, se fue incrementando hasta que el pellet se rompió y se registró dicho peso.

Se repitió la medición de 7 pellets y se registró el promedio del peso aguantado.

2.10 Pruebas de fusión de los pellets para preparar vidrio.

El objetivo final de este proyecto es utilizar pellets de materia prima con un cierto porcentaje de DG, así que después de las pruebas respectivas se tomaron pellets de algunos de los experimentos para fundirlos en el horno y evaluar la apariencia de los vidrios formados. Primeramente se precalentó un crisol de alúmina de 350 ml durante 3 horas a 180°C. Pasado este tiempo se le adicionaron aproximadamente 40 g de pellets y se metió a la cámara regeneradora del puerto 4 del horno VF2, a una temperatura máxima de 1,480°C (en esta zona del horno de flotado la temperatura varía de 1,270°C a 1,480°C en ciclos de 30 minutos).

Se dejaron fundir los pellets durante 2 horas, se vació rápidamente el vidrio fundido sobre una placa de acero y se cubrió con colchoneta cerámica para proteger el vidrio y evitar daños por choque térmico.

Una vez frías las muestras se observaron con el microscopio óptico a 80X para evaluar su apariencia, principalmente buscando defectos provocados por el uso de la sílice amorfa del DG.

2.11 Análisis de los licores.

Para contar con más información para implementar el proceso de tratamiento de aguas a nivel industrial en un futuro, se analizó el agua de lavado.

Durante el proceso de lavado de las muestras de DG #1 y #2 se colectaron las aguas residuales, en un recipiente las de la muestra #1 y en otro recipiente las de la muestra #2. Se filtraron utilizando embudo Buchner, matraz kitasato y papel filtro de 28-40 micras para retirar la materia orgánica y otros sólidos en suspensión, dejando únicamente disolución acuosa.

Se tomaron 150 ml de cada una de las muestras líquidas y se llevaron a sequedad en estufa a 110°C en un matraz Erlenmeyer de 1,000 ml previamente pesado. Una vez seco y frío, se pesó el matraz con su contenido para evaluar el % de sólidos. Estos residuos sólidos se removieron del matraz con una espátula, se homogenizaron y se analizaron en el espectrómetro de rayos X, tal como se describe en 4.1.1.

2.12 Análisis químico por fluorescencia de rayos X.

Con el objetivo de determinar el contenido de sílice (que debe ser mínimo 97%) y de cloro (que no debe sobrepasar el 0.1%) se realizaron análisis de composición química por medio de fluorescencia de rayos X.

Se colocaron aproximadamente 10 g de muestra en polvo dentro del tazón del molino y se molió durante 1 minuto. Este polvo se vertió dentro de una copa portamuestras del aparato de fluorescencia de rayos X y se analizó con el método genérico denominado “Ominan”, programado por el fabricante del equipo, el cual directamente reporta la composición del material analizado (semicuantitativo).

CAPITULO 3.

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

En esta sección se encuentran los resultados obtenidos de la etapa experimental, así como un análisis y discusión de los mismos, mencionando inconvenientes y posibles mejoras encontradas durante el desarrollo de las pruebas.

3.1 Caracterización inicial de las muestras de desecho geotérmico.

Primeramente se hizo un análisis a los desechos de la planta geotérmica de Cerro Prieto para determinar si es factible su uso en la elaboración de vidrio flotado, realizándose los siguientes análisis:

- a) Medición de radiactividad.
- b) Pérdidas por ignición.
- c) Análisis químico por fluorescencia de rayos X.
- d) Análisis por difracción de rayos X.
- e) Granulometría.

Los resultados de los análisis se muestran a continuación:

3.1.1 Radiactividad.

Se realizó para confirmar que el manejo de este material no fuera riesgoso, ya que en este tipo de materiales de plantas geotérmicas se han reportado niveles de

radiactividad tales que no recomiendan su uso para fines comerciales (5). Se midió directamente en contacto con cada una de las muestras, registrando valores entre 7 y 13 mR/h en ambas muestras. Estos mismos valores de radiación se midieron en varias zonas del laboratorio de Grupo Vitro, por lo que no se consideró riesgoso el manejo de este material en este sentido.

3.1.2 Pérdidas por ignición.

Las pérdidas por ignición de las muestras de DG fueron:

- Muestra DG #1: 5.0%
- Muestra DG #2: 20.5%.

Estos resultados obtenidos son muy altos, comparando contra los valores usuales que tiene la arena, que son entre 0.2 y 0.5%. Las especificaciones de Grupo Vitro no incluyen la pérdida por ignición.

Se necesitan realizar otros análisis para determinar la naturaleza del material perdido en la calcinación, por ejemplo pudieran ser carbonatos o materia orgánica.

3.1.3 Fluorescencia de rayos X.

La composición inicial de las muestras de DG sin lavar se presenta en la tabla VII.

Tabla VII. Composición inicial del DG analizada por FRX standardless (%)

	SiO ₂	Cl	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
DG, muestra #1	92.5	4.0	0.1	0.0	0.8	0.3	0.1	2.0
DG, muestra #2	41.8	29.0	0.0	0.0	7.8	2.1	0.3	18.6
Especificación arena sílica para vidrio flotado (min)	97	0	0	0.75	0	0	0.1	0
Especificación arena sílica para vidrio flotado (max)	100	0.1	0.13	0.95	0.52	0.22	0.12	0.24

Como se puede observar, ninguna de las dos muestras de DG cumplen con las especificaciones requeridas para una arena para el proceso de flotado. La muestra #1 contiene contaminantes afuera del rango especificado para Cl, Al_2O_3 , K_2O , CaO y Na_2O y la muestra #2 tampoco cumple para los mismos elementos y óxidos, pero además contiene más Fe_2O_3 que el permitido.

De todos estos contaminantes, el de mayor riesgo es el cloro, por lo que ya se ha descrito en la sección de introducción, así que se propuso someter las muestras a un proceso de lavado para reducir el contenido de cloro y los otros contaminantes, así como para incrementar el contenido de sílice.

El Al_2O_3 está debajo del rango aceptable, lo cual no es problema para el proceso.

También resalta el hecho de que la muestra #2 está visiblemente más impura, con un contenido muy bajo de sílice.

3.1.4 Granulometría inicial.

A ambas muestras de DG se les midió su granulometría, los resultados son mostrados en la tabla VIII.

Se puede observar que ninguna de las dos muestras del desecho geotérmico cumple con la especificación de partículas finas, la cual es que no deben contener granos menores de 0.07 mm. La muestra #1 tiene 33% de partículas menores a este valor, mientras que la muestra #2 tiene 14%, lo cual es inadecuado para una materia prima para la fabricación

de vidrio flotado. Se sugirió un proceso de aglomeración para poder utilizar este material para el fin propuesto. En su defecto, podría cribarse para separar los sólidos finos.

Tabla VIII. Granulometría inicial de las muestras de desecho geotérmico.

Malla	Abertura de malla (mm)	Especificación para arena sílica	DG #1 sin lavar (% retenido, acumulado)	DG #2 sin lavar (% retenido, acumulado)
12	1.68		0	0
18	1.00		0	0
30	0.60		0	21
40	0.40	1.5% máximo retenido en malla 40	0	38 (No cumple)
70	0.21		25	63
100	0.15		37	72
120	0.13	93% mínimo debe retenerse en malla 120	47	77
200	0.07	100% debe retenerse en malla 200	67 (no cumple)	86 (no cumple)

3.1.5 Difracción de rayos X en polvo.

Este análisis se realizó para determinar la forma cristalina en la que se encuentra el material, lo que nos proporciona información de su posible comportamiento, por ejemplo reactividad y facilidad de fusión. Al realizar la caracterización por difracción de rayos X de DG #1 y DG #2 resultó evidente que se trata de un material amorfo, ya que presenta un pico muy amplio en el difractograma. El análisis también reportó otros picos bien definidos, los cuales se compararon con espectros de la base de datos PDF2010, en la

computadora del mismo equipo, determinando que éstos son de cloruro de sodio, cuarzo (SiO_2), anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), halita (sal de roca – NaCl -), soda-melilita y sylvita (KCl).

En las figuras 17 y 18 se muestran los respectivos difractogramas de las muestras DG 1 y DG 2.

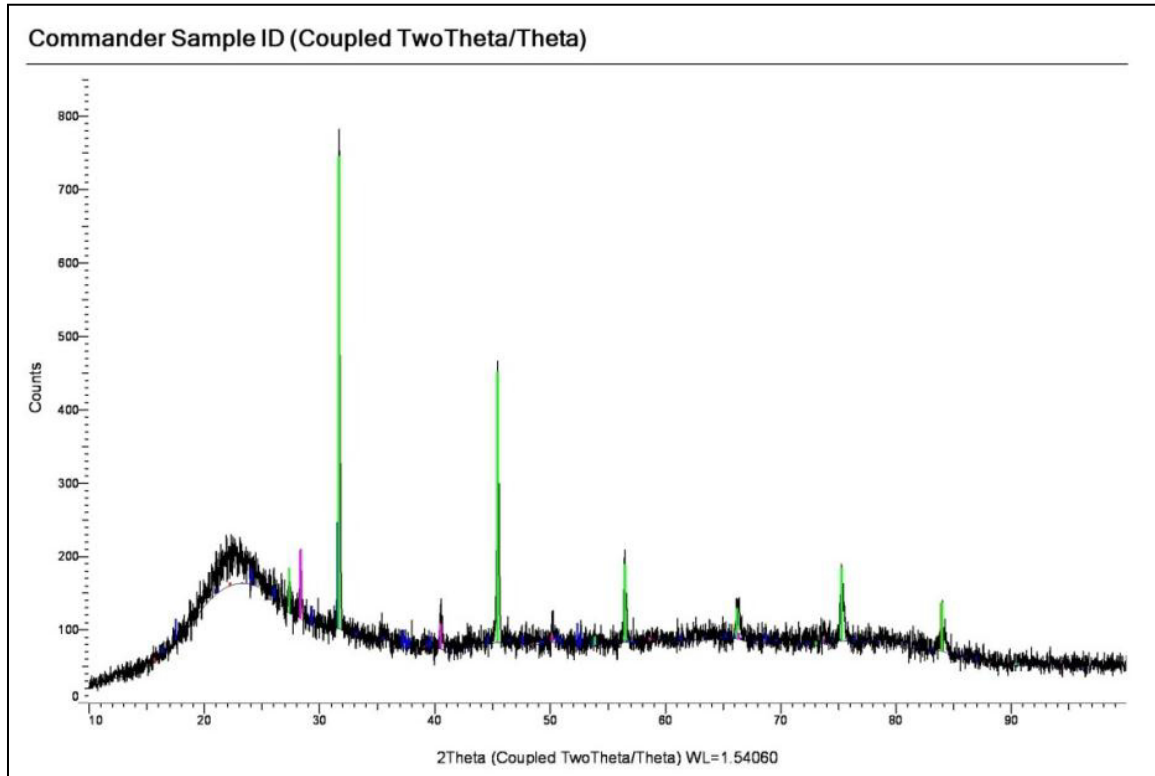


Figura 17. Difractograma de muestra #1 de desecho geotérmico.

En color azul se identifican los picos correspondientes a soda-melilita (silicato de sodio, calcio y aluminio), PDF 01-071-2066.

En color verde se identifican los picos correspondientes al cloruro de sodio, PDF 01-077-3565.

En color magenta se encuentran los picos de la Sylvita (cloruro de potasio), PDF 00-041-1476.

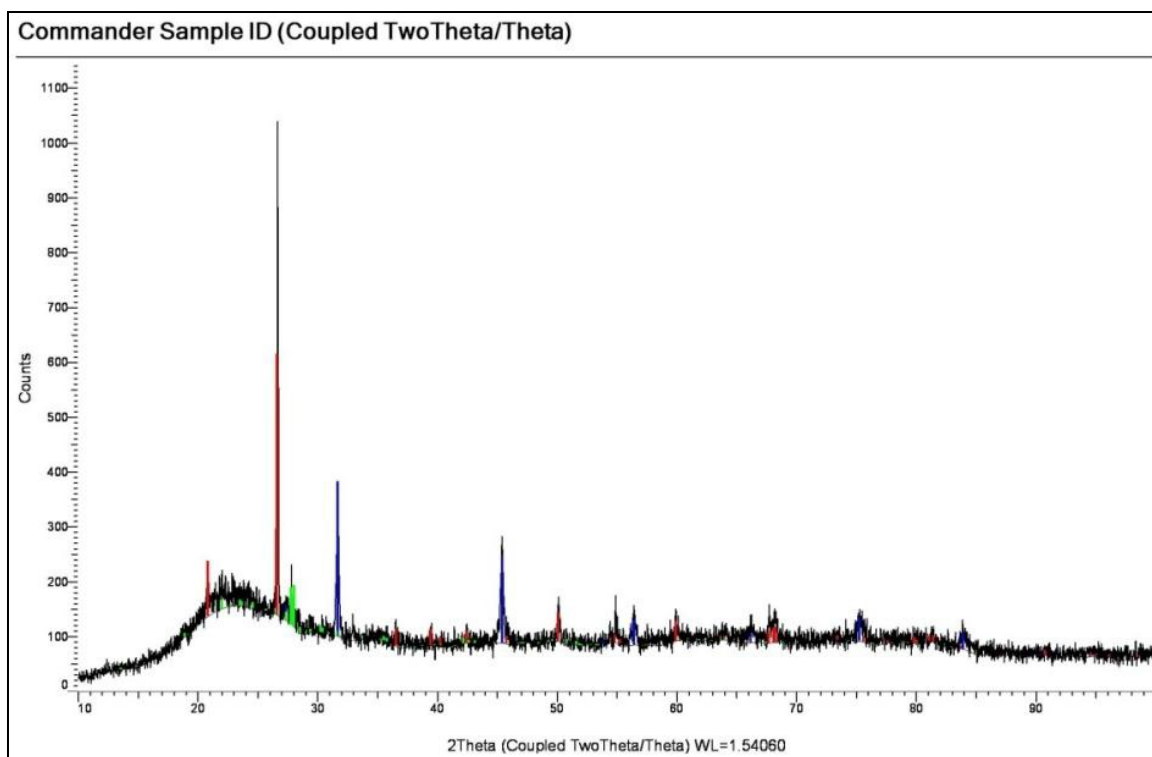


Figura 18. Difractograma de muestra #2 de desecho geotérmico.

En color rojo se identifican los picos correspondientes al cuarzo(dióxido de silicio), PDF 01-075-8322.

En color azul se identifican los picos correspondientes a la halita (cloruro de sodio), PDF 01-070-2509.

En color verde se encuentran los picos de la Anorthita (silicato de calcio y aluminio), PDF 00-041-1486.

3.1.6 Lavado del desecho geotérmico.

Con la finalidad de eliminar impurezas, en particular cloro, y elevar el contenido de sílice se llevaron a cabo varios procesos de lavado.

El rendimiento del proceso después del ciclo de lavado fue el siguiente:

Muestra #1: 71%

Muestra #2: 42%

Esto significa que durante el proceso de lavado de las muestras DG 1 y DG 2 se pierde el 29% y el 58% respectivamente del material, lo cual deberá considerarse en la etapa del tratamiento de aguas si se implementa este proyecto.

3.1.7 Análisis de los licores.

El contenido de la materia disuelta en el agua residual del lavado del DG fue el siguiente:

Muestra #1: 3.6%

Muestra #2: 8.1%

Se analizó por FRX la composición química del material seco que quedó en los matraces después de la evaporación, con los resultados mostrados en la tabla IX, en la cual se confirma el alto contenido de cloro y otros contaminantes en el agua de lavado.

Tabla IX. Composición química de los sólidos disueltos en el agua de lavado DG (%)

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Cl
Agua de lavado Muestra #1	9.5	0.0	0.7	4.6	20.3	7.9	0.0	55.9
Agua de lavado Muestra #2	19.1	0.2	0.3	2.5	10.1	3.1	0.0	63.7

3.2 Experimentos de lavado.

En seguida se encuentran los principales resultados de los experimentos de lavado del DG. Los resultados completos de los análisis se muestran en la sección 3.2.4.

3.2.1 Experimentos de lavado números 1 y 2

El experimento 1 corresponde al lavado DG #1 en frío y el experimento 2 es la misma muestra lavada en caliente. Se realizaron los lavados tal como se mencionó en la sección 2.4.

Una vez secas las muestras después de cada lavado, se analizaron por medio de fluorescencia de rayos X, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 19 y 20.

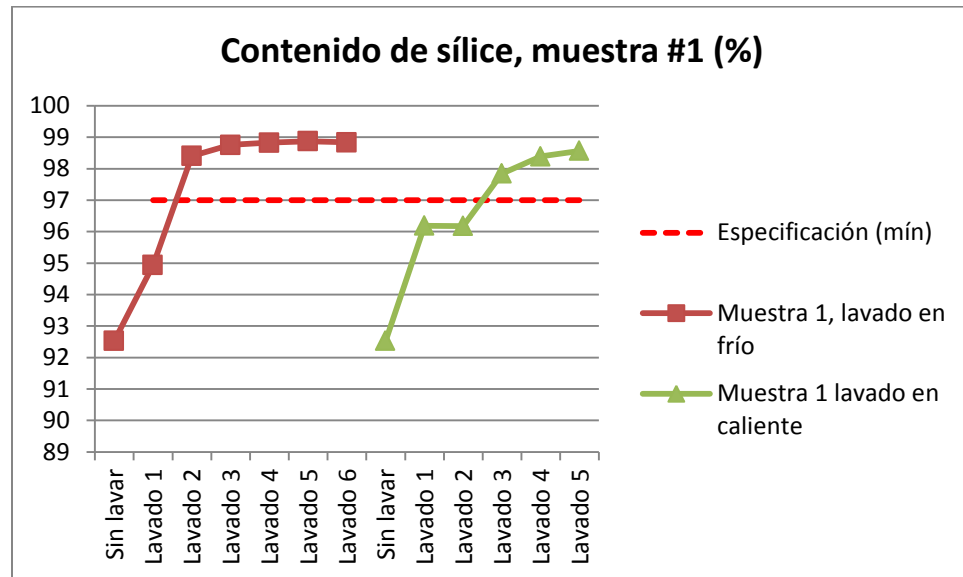


Figura 19, gráfica del contenido de sílice, muestra 1

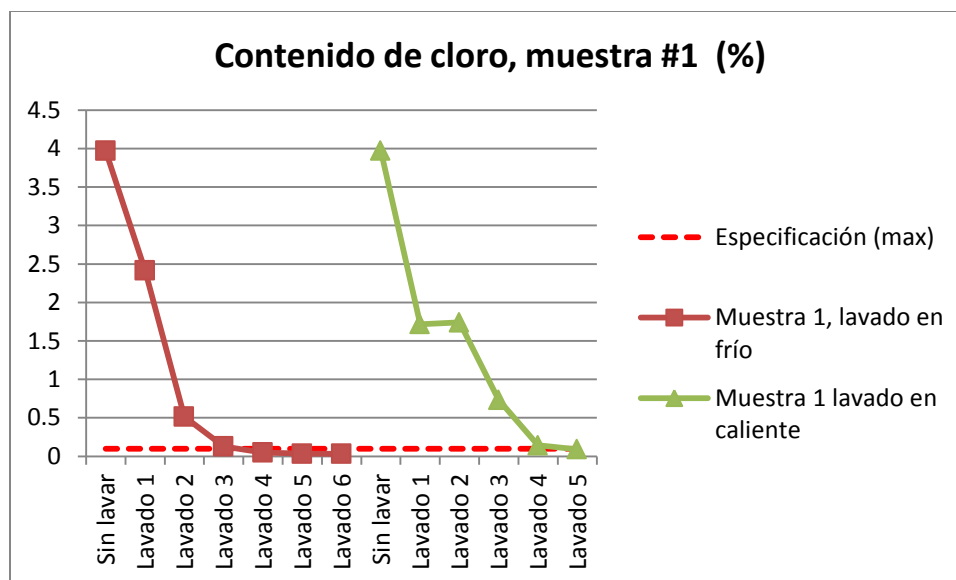


Figura 20, gráfica del contenido de cloro, muestra 1

En los experimentos con la muestra #1 los lavados fueron muy efectivos tanto para alcanzar el contenido mínimo de sílice como para reducir el contenido de cloro, cumpliendo en ambos casos con la especificación.

Se esperaba que el lavado con agua caliente diera mejores resultados que el realizado con agua templada, sin embargo el comportamiento fue muy similar, tal como se aprecia en las figuras 19 y 20.

El lavado en frío cumplió las especificaciones para cloro después de 4 lavados; el caso en caliente, se requirieron 5 lavados. Para la sílice, el lavado en frío requirió 2 lavados, mientras que el lavado en caliente requirió 3.

3.2.2 Experimento de lavado número 3.

Este experimento corresponde al lavado en caliente de la muestra #2, cribada a un tamaño máximo de 4 mm (pasa malla 5).

Se esperaba que las partículas grandes fueran reduciendo su tamaño visiblemente durante el proceso de lavado, pero no sucedió así.

Después de los lavados se realizaron los correspondientes análisis químicos, con los resultados mostrados en las figuras 21 y 22.

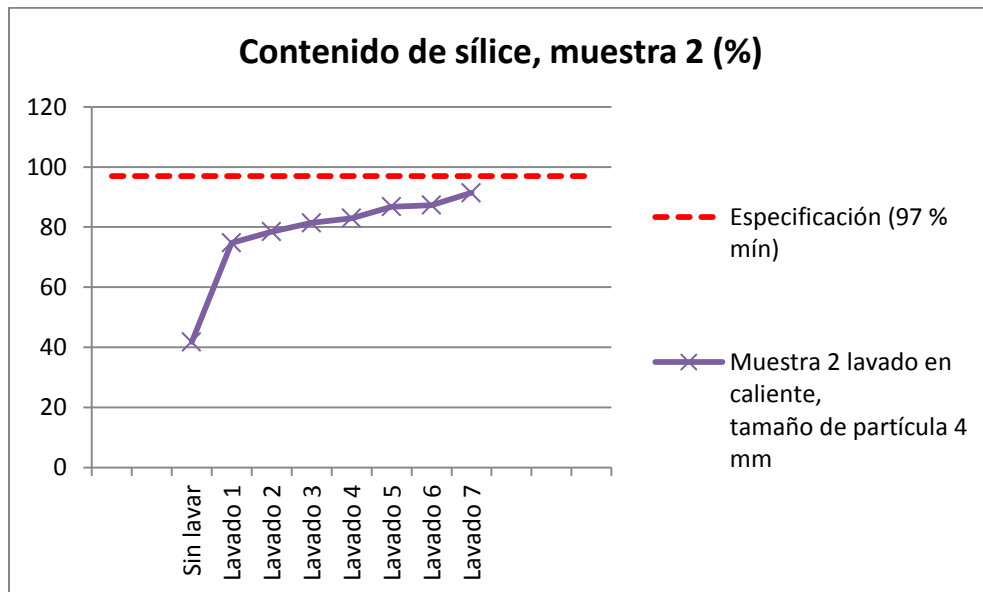


Figura 21, gráfica del contenido de sílice, muestra 2

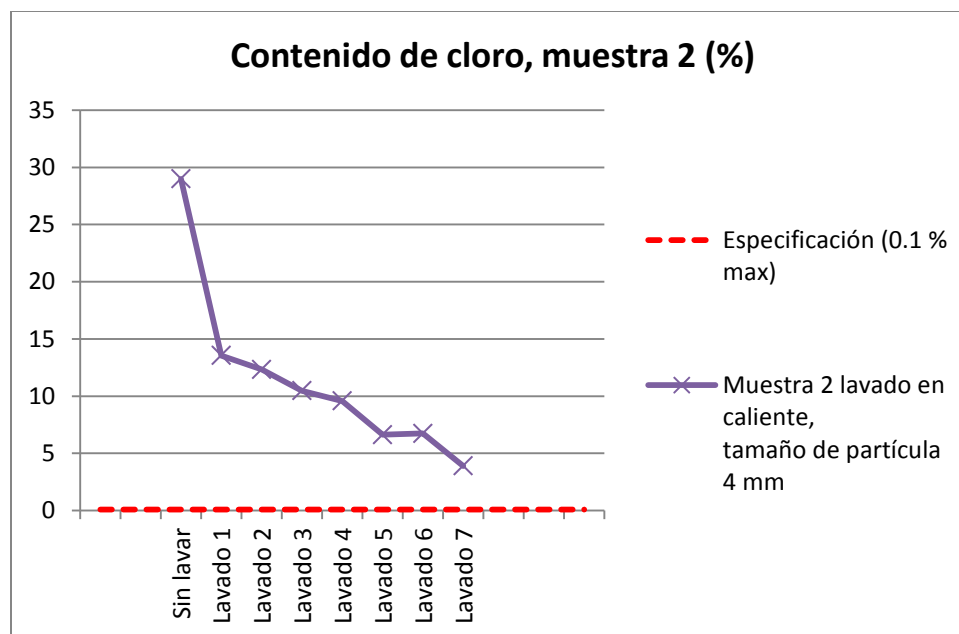


Figura 22, gráfica del contenido de cloro, muestra 2

Como se puede observar, presenta una tendencia favorable en los gráficos, pero no se cumplió el requerimiento ni para sílice ni para cloro, por lo que se decidió moler más la muestra para los siguientes experimentos para hacer más eficiente el proceso de lavado.

3.2.3 Experimentos de lavados números 4 y 5.

El experimento 4 corresponde al lavado DG #2 en frío y el experimento 5 es la misma muestra lavada en caliente.

Se molió la muestra #2 en mortero a un tamaño de partícula máximo de 1.0 mm (pasa malla 18) para estos experimentos.

Se lavaron simultáneamente 300g de muestra #2 en caliente y otro tanto en frío, y se analizaron químicamente las muestras después de cada lavado, con los resultados mostrados en las figuras 23 y 24.

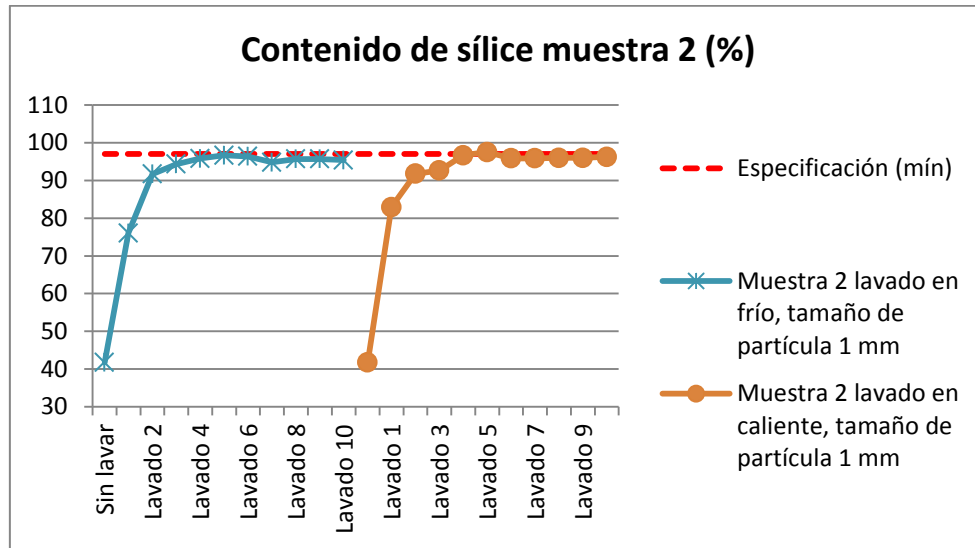


Figura 23. gráfica del contenido de sílice, muestra DG#2

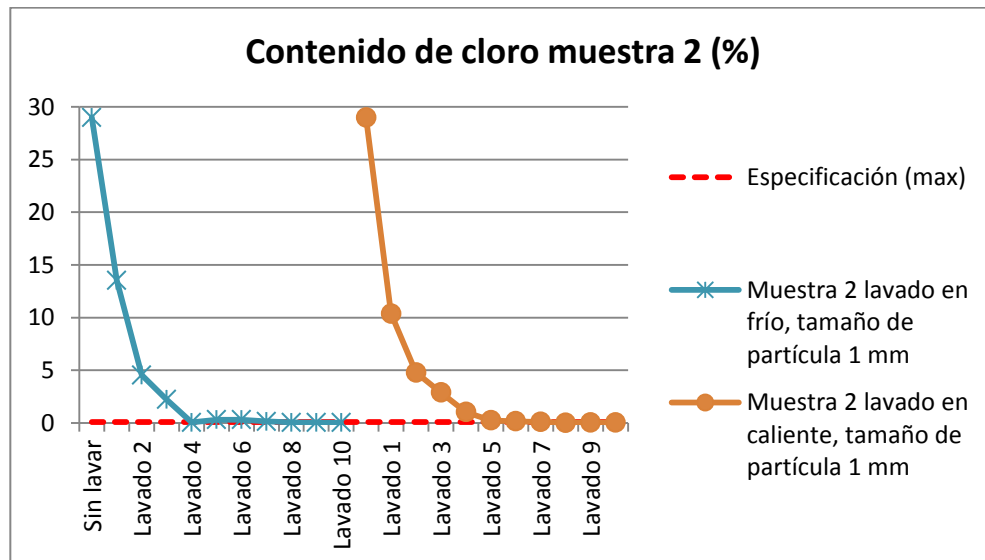


Figura 24, gráfica del contenido de cloro, muestra DG#2

Similar a lo ocurrido con la muestra #1, no hubo diferencia relevante entre el lavado en frío y en caliente.

Para el caso del cloro, la especificación se cumplió después de 8 lavados en frío y 7 lavados en caliente, pero no alcanzó la meta de 97% mínimo de pureza en sílice en los 10 lavados, presentando un comportamiento asintótico.

3.2.4 Resultados completos de los experimentos de lavado.

Además del contenido de sílice y cloro, los cuales son los componentes más importantes en nuestro material, también se analizaron otros óxidos, los cuales no representan mayor problema en este proyecto. En la tabla X se encuentran los resultados completos de los análisis químicos realizados a en cada uno de los experimentos durante el proceso de lavado de las muestras de DG, así como de las muestras sin lavar.

TABLA X resultados de los análisis químicos durante el lavado del DG.

ANÁLISIS QUIMICO DE MUESTRAS DE DESECHO GEOTÉRMICO DURANTE EL PROCESO DE LAVADO.

	MgO	Al2O3	SiO2	K2O	CaO	Fe2O3	Cl	Na2O	TiO2	MnO	SO3
Muestra 1, sin lavar	0.10	0.00	92.53	0.77	0.30	0.14	3.97	2.00	0.00	0.06	0.00
Muestra 1, lavado en frío #1	0.13	0.00	94.94	0.60	0.36	0.12	2.42	1.25	0.00	0.06	0.00
Muestra 1, lavado en frío #2	0.09	0.00	98.40	0.33	0.17	0.12	0.52	0.21	0.00	0.06	0.00
Muestra 1, lavado en frío #3	0.10	0.31	98.76	0.28	0.15	0.11	0.13	0.01	0.00	0.06	0.00
Muestra 1, lavado en frío #4	0.14	0.29	98.83	0.28	0.14	0.12	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00
Muestra 1, lavado en frío #5	0.12	0.26	98.88	0.28	0.15	0.12	0.04	0.00	0.00	0.06	0.02
Muestra 1, lavado en frío #6	0.12	0.26	98.84	0.27	0.18	0.12	0.03	0.04	0.00	0.06	0.00
Muestra 1, sin lavar	0.10	0.00	92.53	0.77	0.30	0.14	3.97	2.00	0.00	0.06	0.00
Muestra 1 lavado en caliente #1	0.00	0.00	96.19	0.48	0.23	0.13	1.72	1.08	0.00	0.06	0.00
Muestra 1 lavado en caliente #2	0.01	0.00	96.18	0.48	0.22	0.13	1.74	1.08	0.00	0.06	0.00
Muestra 1 lavado en caliente #3	0.00	0.00	97.85	0.36	0.17	0.12	0.73	0.61	0.00	0.06	0.00
Muestra 1 lavado en caliente #4	0.04	0.33	98.39	0.28	0.14	0.12	0.14	0.40	0.00	0.06	0.00
Muestra 1 lavado en caliente #5	0.03	0.27	98.57	0.28	0.14	0.12	0.09	0.35	0.00	0.06	0.00
Muestra 2, grano 4 mm, sin lavar	0.04	0.00	41.80	7.77	2.05	0.35	28.99	18.60	0.03	0.03	0.14
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #1	0.04	0.13	74.77	2.59	1.40	0.54	13.56	6.63	0.07	0.03	0.11
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #2	0.04	0.00	78.48	2.69	1.05	0.41	12.33	4.66	0.05	0.03	0.12
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #3	0.08	0.00	81.39	2.38	1.00	0.53	10.47	3.81	0.06	0.03	0.12
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #4	0.04	0.00	82.96	2.18	0.92	0.45	9.58	3.56	0.05	0.03	0.12
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #5	0.03	0.00	86.80	1.55			6.63	2.90	0.05		
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #6	0.04	0.00	87.30	1.57	0.74	0.47	6.74	2.85	0.06	0.03	0.10
Muestra 2, grano 4 mm, lavado en caliente #7	0.05	0.00	91.41	1.07	0.54	0.54	3.90	2.21	0.05	0.03	0.10
Muestra 2, grano 1 mm, sin lavar	0.04	0.00	41.80	7.77	2.05	0.35	28.99	18.60	0.03	0.03	0.14
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #1	0.06	0.00	76.04	3.00	1.72	0.89	13.53	4.15	0.10	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #2	0.00	0.00	91.68	1.50	0.97	0.76	4.56	0.00	0.10	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #3	0.00	0.00	94.32	0.99	0.80	0.73	2.23	0.45	0.11	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #4	0.03	1.45	95.80	0.67	0.78	0.73	0.05	0.00	0.13	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #5	0.00	0.32	96.67	0.76	0.81	0.64	0.32	0.00	0.09	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #6	0.01	1.26	96.35	0.59	0.63	0.68	0.32	0.00	0.08	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #7	0.11	1.85	94.79	0.77	0.98	0.84	0.14	0.00	0.15	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #8	0.11	1.53	95.67	0.65	0.76	0.81	0.05	0.00	0.12	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #9	0.06	1.47	95.70	0.66	0.78	0.84	0.04	0.00	0.12	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en frío #10	0.09	1.69	95.38	0.67	0.80	0.87	0.04	0.00	0.13	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, sin lavar	0.04	0.00	41.80	7.77	2.05	0.35	28.99	18.60	0.03	0.03	0.14
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #1	0.00	0.00	82.93	2.99	1.27	0.53	10.39	1.44	0.07	0.03	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #2	0.00	0.00	91.78	1.47	0.84	0.63	4.79	0.00	0.07	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #3	0.00	0.00	92.62	1.06	0.74	0.67	2.90	1.58	0.08	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #4	0.00	0.00	96.66	0.68	0.61	0.61	1.05	0.00	0.07	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #5	0.00	0.00	97.50	0.56	0.67	0.60	0.26	0.00	0.08	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #6	0.09	1.39	95.84	0.63	0.72	0.72	0.16	0.00	0.11	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #7	0.12	1.39	95.84	0.60	0.77	0.73	0.10	0.00	0.11	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #8	0.11	1.44	95.99	0.60	0.71	0.70	0.03	0.00	0.10	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #9	0.10	1.40	95.99	0.57	0.72	0.72	0.06	0.00	0.11	0.04	0.00
Muestra 2, grano 1 mm, lavado en caliente #10	0.08	1.25	96.24	0.52	0.65	0.80	0.04	0.00	0.08	0.04	0.00

3.2.5 Granulometría final.

Después del proceso de lavado, se realizó otro análisis de granulometría, y se comparó contra los resultados iniciales.

Como se puede observar en la tabla XI, la granulometría de ambas muestras es muy similar antes y después de lavar este material.

TABLA XI. Resultados de granulometría del desecho geotérmico.

Malla	Abertura de malla (mm)	Especificación para arena sílica	DG #1 sin lavar (% retenido, acumulado)	DG #1 lavado (% retenido, acumulado)	DG #2 sin lavar (% retenido, acumulado)	DG #2 lavado (% retenido, acumulado)
12	1.68		0	0	0	0
18	1.00		0	0	0	0
30	0.60		0	0	21	21
40	0.40	1.5% máximo retenido en malla 40	0	0	38 (No cumple)	36 (No cumple)
70	0.21		25	7	63	59
100	0.15		37	26	72	71
120	0.13	93% mínimo debe retenerse en malla 120	47	37	77	77
200	0.07	100% debe retenerse en malla 200	67 (no cumple)	60 (no cumple)	86 (no cumple)	87 (no cumple)

3.3 Experimentos de pelletización.

3.3.1 Resumen del comportamiento del pelletizado.

En los primeros 12 experimentos se utilizaron 100 g de materias primas sólidas, pero la cantidad de material era un poco difícil de manejar en la pelletizadora, principalmente en las mezclas con alto contenido de DG, así que se probó reduciendo la muestra al 50%, dando buenos resultados de manejo de este volumen de material, por lo

que el resto de los experimentos se realizó con ese tamaño de lote, excepto el número 16, que se volvió a probar con 100 g.

En todas las pruebas se utilizó la misma proporción de materias primas (dolomita, soda, sulfato de sodio y carbón), pero la sílice estuvo conformado por proporciones diferentes de arena sílica + DG, desde 0 hasta 100%.

En la primera prueba no se obtuvieron pellets debido a exceso de agua, pero poco a poco se fue adquiriendo experiencia, aprendiéndose en general lo siguiente:

En todos los casos fue posible obtener pellets, independientemente del aditivo utilizado, siempre y cuando se utilizara la cantidad adecuada de agua. Si le faltaba agua a la mezcla, se formaban algunos pellets entre 2 y 4 mm y el resto eran pellets mucho más pequeños, o bien, granos aislados. Al agregar más agua, invariablemente se formaban más pellets y más grandes.

Al agregar mucha agua, los pellets crecían hasta unos 15 mm, pero repentinamente se volvían plastas que ya no giraban y se pegaban al plato, formándose lodo.

De acuerdo con lo mencionado en la metodología experimental, el agua siempre se le agregó únicamente a la sílice, y fue notable que el DG requería sensiblemente más agua para lograr la misma apariencia de humedad, respecto a la arena sílica, de manera que la cantidad de agua “adecuada” para obtener buenos pellets dependía del porcentaje de sustitución de arena por DG.

El ligante se agregó sobre el material sólido trabajando la pelletizadora, normalmente en unos 30 segundos o menos, y durante la adición se formaban

inmediatamente los pellets. Después de agregado el ligante, los pellets crecían durante otros 30 segundos aproximadamente, para llegar a un punto aparente de equilibrio, en el cual la cantidad y tamaño de los pellets permanecía muy similar. Se dejaron unos minutos más para consolidar mejor los pellets.

Al utilizar silicato, los pellets recién hechos eran más moldeables, mientras que al utilizar hidróxido de sodio los pellets se fracturaban más fácilmente al manipularlos.

Los pellets verdes en todos los casos soportaron sólo unos cuantos gramos sin deformarse. Ninguno soportó más de 100 g.

Los pellets formados con hidróxido de sodio como ligante tendieron a pegarse entre ellos, de manera que al secarse se formaban aglomerados de pellets, a veces difíciles de separar. Este efecto se presentó en mucho menor medida con el uso de silicato de sodio.

3.3.2 Experimentos exploratorios.

3.3.2.1 Experimentos con 100% arena de sílice como vitrificante.

Se realizaron 7 pruebas de pelletizado utilizando como vitrificante sólo arena de sílice y entre el 5.1 y el 12% de silicato de sodio como ligante.

En todos los casos los pellets secos soportaron sobre ellos un peso de al menos 1.7 Kg, excepto cuando se utilizó 5.1% de silicato, lo que provocó pellets muy débiles que se deshacían fácilmente al levantarlos una vez secos.

También se realizaron dos experimentos utilizando hidróxido de sodio como ligante, igualmente con buenos resultados en porcentaje de pelletización y resistencia. La composición de las muestras se presenta en la tabla XII.

Tabla XII. Pelletización con 100% de arena de sílice como vitrificante.

Número de experimento	% Desecho Geotérmico	% arena	% silicato en solución acuosa al 50 %	% agua extra	% NaOH en solución acuosa al 25 %	Comentarios de formación de los pellets	Apariencia de humedad	Peso soportado sin romperse (Kg)
1	0	100	21	19.5	0	Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo	
2	0	100	12	16	0	Bien formados	Bien	2
3	0	100	12	21	0	Bien formados	Bien	2
4	0	100	9	20.7	0	Bien formados	Bien	2
5	0	100	7	12.1	0	Bien formados	Bien	2
16	0	100	5.1	13.1	0	Se deshacen fácilmente, pero se pueden manipular	Bien	0.1
17	0	100	9	20.8	0	Bien formados	Bien	1.7
21	0	100	0	14.4	14	Bien formados	Bien	2
22	0	100	0	13	18.4	Bien formados	Muy húmedos	2

3.3.2.2 Experimentos con 100% DG como vitrificante.

Se realizaron experimentos variando la cantidad de silicato de sodio desde 4.8 hasta 28.6%. En todos los casos los pellets soportaron al menos un peso de 1 Kg, excepto el de

mayor cantidad de silicato, que formó pellets demasiado débiles que se deshacían al levantarlos con la mano.

En uno de los experimentos no se utilizó ni hidróxido ni silicato de sodio, únicamente se agregó agua como ligante, igualmente con buenos resultados, soportando los pellets secos 1 Kg de peso sobre ellos sin romperse.

La composición del material utilizado se muestra en la tabla XIII.

Tabla XIII. Pelletización con 100% de DG como vitrificante.

Número de experimento	% Desecho Geotérmico	% arena	% silicato en solución acuosa al 50 %	% agua extra	% NaOH en solución acuosa al 25 %	Comentarios de formación de los pellets	Apariencia de humedad	Peso soportado sin romperse (Kg)
11	100	0	28.6	74	0	Se deshacen al levantarlos secos	Bien	0
12	100	0	14.6	84.5	0	Bien formados	Bien	1
13	100	0	NO	94	0	Bien formados	Bien	1
14	100	0	8.6	96	0	Bien formados	Muy húmedos	1.5
15	100	0	4.8	96.4	0	Bien formados	Bien	1

3.3.2.3 Experimentos con 20 al 50% de DG como vitrificante.

Al aglomerar las materias primas utilizando del 20 al 50% de DG como vitrificante, y silicato y agua como aglomerantes, sucedió un fenómeno inesperado: los pellets formados comenzaron a pulverizarse poco a poco mientras se secaban, de manera que

(a)

(b)

(c)

Esto también sucedió para uno de los experimentos en los que se utilizó el 15% de DG (en el que se utilizó menos cantidad de silicato). No se observó este comportamiento en mezclas con menos del 15%, pero curiosamente tampoco se presentó al utilizar como vitrificante 100% de DG. La composición de las mezclas se muestra en la tabla XIV.

Se presenta la siguiente información que pudiera ayudar a explicar este comportamiento:

68

aglomeración de materiales, pero en las condiciones de estos experimentos

aparentemente no está polimerizando adecuadamente, lo cual puede ser por lo siguiente:

- a) Cantidad de agua: Al existir poca agua en el medio, la gelación es más rápida, con lo que las ligas formadas son más débiles (30). En el caso de la mezcla de materias primas para vidrio, la sílice amorfa tiende a absorber más agua que la arena de sílice, además la soda también tiende a absorber agua, dejando con poco líquido el medio.
- b) La polimerización del silicato ocurre más lento a pH mayores a 8 (30). Aunque no se midió el pH de la mezcla de materias primas, se sabe que en general son álcalis, por lo que la gelación es más lenta en este caso, aunque también es necesario mencionar que cuando se utilizó hidróxido de sodio como ligante, no se presentó este fenómeno, siendo que en este caso el pH era mayor que con el silicato.
- c) El incremento de temperatura provoca evaporación del agua, y en el caso de la mezcla de materias primas, al agregar agua, se incrementa su temperatura, por lo que contribuye a reducir la calidad de la polimerización del silicato, pero aplicaría el mismo comentario sobre el hidróxido de sodio presentado en el inciso b).
- d) En la literatura se encuentran referencias a problemas de inconsistencia en el sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ para ciertas estequiometrias, que afectan la resistencia de los materiales, posiblemente debido a que afectan negativamente su polimerización (30).

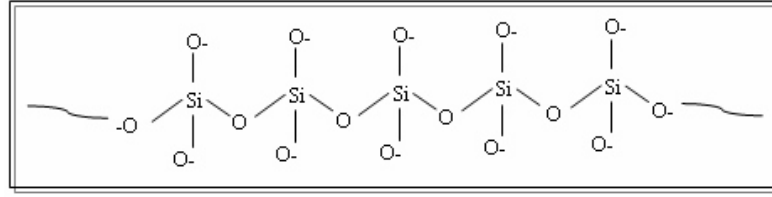


Figura 26. Esquema de la polimerización del silicato de sodio.

Tabla XIV. Pelletización con 5 al 50% de DG como vitrificante.

Número de experimento	% Desecho Geotérmico		% arena		% silicato en solución acuosa al 50 %		% agua extra		% NaOH en solución acuosa al 25 %		Comentarios de formación de los pellets	Apariencia de humedad	Peso soportado sin romperse (Kg)
6	50	50	7	47.2	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien	0					
7	50	50	8	56	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Muy húmedos	0					
8	50	50	10	42.3	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Muy húmedos	0					
9	50	50	20	32.4	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	faltó agua	0					
10	50	50	14.2	36	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	faltó agua	0					
18	10	90	9.2	25.6	0	Se deshacen al levantarlos secos	Bien	0					
19	20	80	10.6	28.6	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien	0					
20	30	70	9.2	30.6	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien	0					
23	10	90	0	22.2	9.8	Bien formados	Bien	2					
24	10	90	0	12.2	22.4	Bien formados	Bien	2					
25	30	70	0	40.4	9.6	Se formaron pellets,se deshicieron muchos al secarse	Bien	1.2					
26	30	70	0	29.6	21.2	Bien formados	Bien	1.5					
27	10	90	19.4	19	0	Pellets muy grandes pero bien formados.	Muy húmedos	1.5					
28	5	95	20	15	0	Bien formados	Muy húmedos	1.2					

3.3.2.4 Experimentos con 5 al 10% de DG como vitrificante.

De las cinco pruebas realizadas, cuatro soportaron al menos 1.2 Kg, y sólo en un caso se presentó el fenómeno de que los pellets se deshacían al levantarlos secos.

En la tabla XIV se muestran las composiciones y algunos comentarios de esta serie de experimentos.

3.3.3 Diseño de experimentos.

Con los resultados obtenidos en las pruebas preliminares explicados en el apartado 4.3.2, incluyendo los problemas encontrados en las concentraciones superiores a 20%, se decidió realizar las siguientes pruebas en el rango de 5 al 15% de sustitución de arena por DG, por lo que se elaboró el diseño de experimentos como se presentó en el apartado de metodología experimental.

En la tabla XV se encuentran los principales comentarios sobre los experimentos de pelletización.

Tabla XV. Pelletización del diseño de experimentos.

Número de experimento	% Desecho Geotérmico	% arena	% silicato en solución acuosa al 50 %	% agua extra	% NaOH en solución acuosa al 25 %	Comentarios de formación de los pellets	Apariencia de humedad	Peso soportado sin romperse (Kg)
29	5	95	0	18	8	Bien formados	Bien	1.5
30	5	95	0	20	14.4	Bien formados	Bien	2
31	5	95	0	22	22	Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo	
32	10	90	0	22	8.2	Bien formados	Bien	2
33	10	90	0	18	14	Bien formados	Bien	2
34	10	90	0	20	22	Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo	
35	15	85	0	20	8	Pocos pellets, faltó agua	faltó agua	1.5
36	15	85	0	22	14	Bien formados	Bien	2
37	15	85	0	18	22	Bien formados	Bien	2
38	5	95	10	18	0	Bien formados	Bien	0.1
39	5	95	20	12	0	Bien formados	Bien	1
40	5	95	30	6	0	Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo	
41	10	90	10	22	0	Se formaron ojuelas al secarse.	Bien	0
42	10	90	20	8	0	Pocos pellets, faltó agua	faltó agua	0.1
43	10	90	30	2	0	Bien formados	Bien	1.2
44	15	85	10	26	0	Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien	
45	15	85	20	16	0	Bien formados	Bien	0
46	15	85	30	0	0	Bien formados	Bien	0.2

3.3.3.1 Humedad.

La cantidad de humedad presente en los pellets verdes estuvo en el rango de 17 a 23%. Más allá de este punto, los pellets se transformaron en plastas de lodo, que fue el caso de los experimentos números 31, 34, 40 y 44.

Los pellets del resto de los experimentos aparentaron tener una cantidad adecuada de agua, excepto los números 35 y 42, los cuales se apreciaban un poco secos.

El comportamiento general de la humedad fue similar para ambos bloques del diseño de experimentos, tal como se presenta en la figura 27.

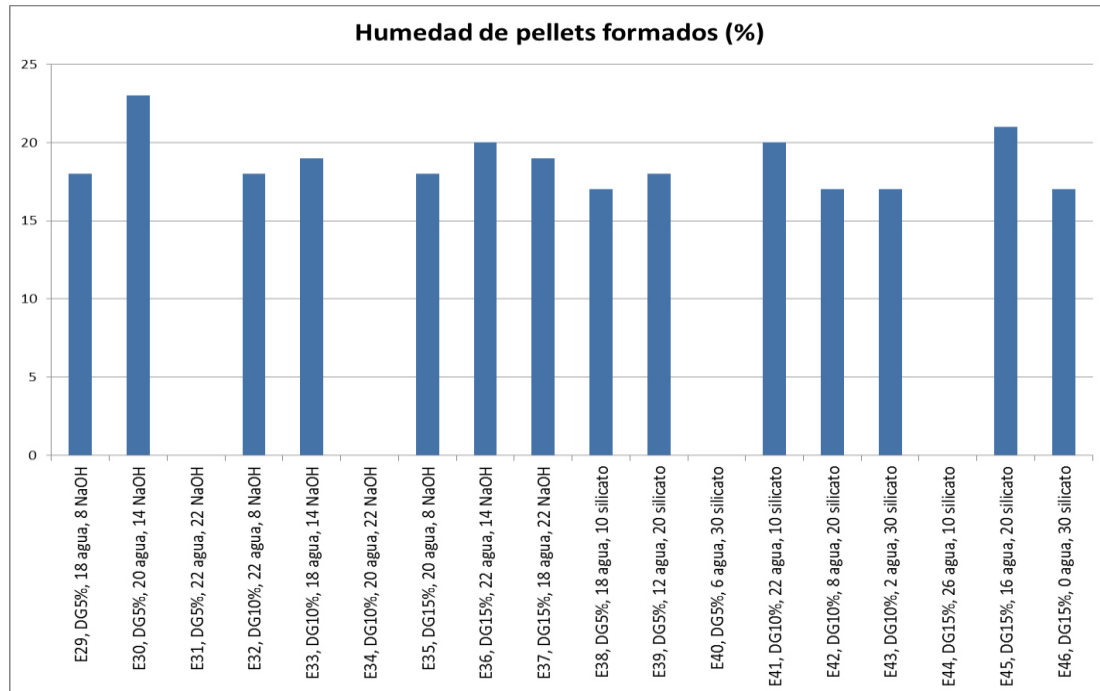


Figura 27, gráfica de humedad de pellets.

3.3.3.2 Porcentaje de formación de pellets.

La evaluación de la formación de pellets se segregó en 2 grupos: mayores a 4.76 mm (retenido en malla #4) y mayores a 1.68 mm (retenidos en malla #12).

Se aprecia un mejor desempeño del hidróxido de sodio sobre el silicato; excluyendo los experimentos en los que no se formaron pellets por exceso de agua, o en

el que se deshicieron los pellets al secarse, el promedio de formación de pellets fue de 88% para el NaOH contra 69% para el silicato. Este comportamiento se aprecia en la figura 28.

Si tomamos en cuenta únicamente los pellets grandes (retenidos en malla #4), podemos ver que se tuvieron 5 experimentos con NaOH y 2 experimentos con silicato en los que el porcentaje de pelletización fue mayor al 80%, pero sin apreciarse una tendencia clara entre la cantidad de ligantes y la formación de pellets, como se puede observar en las figuras 28 y 29.

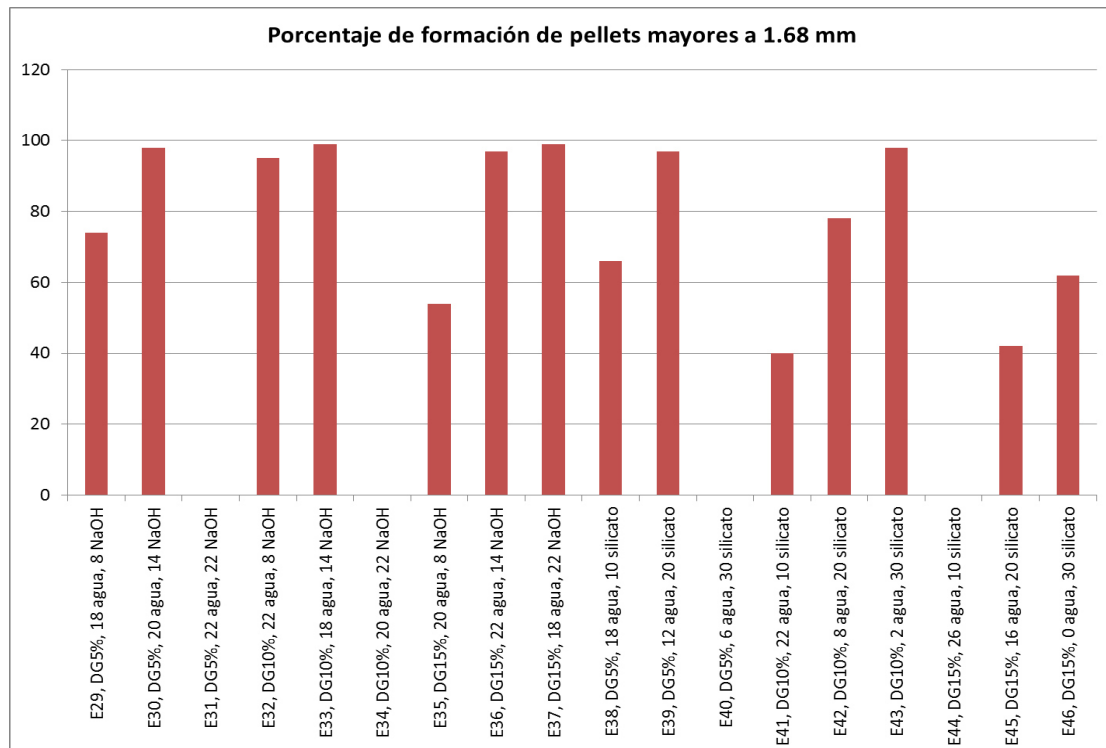


Figura 28, porcentaje de formación de pellets mayores a 1.68 mm.

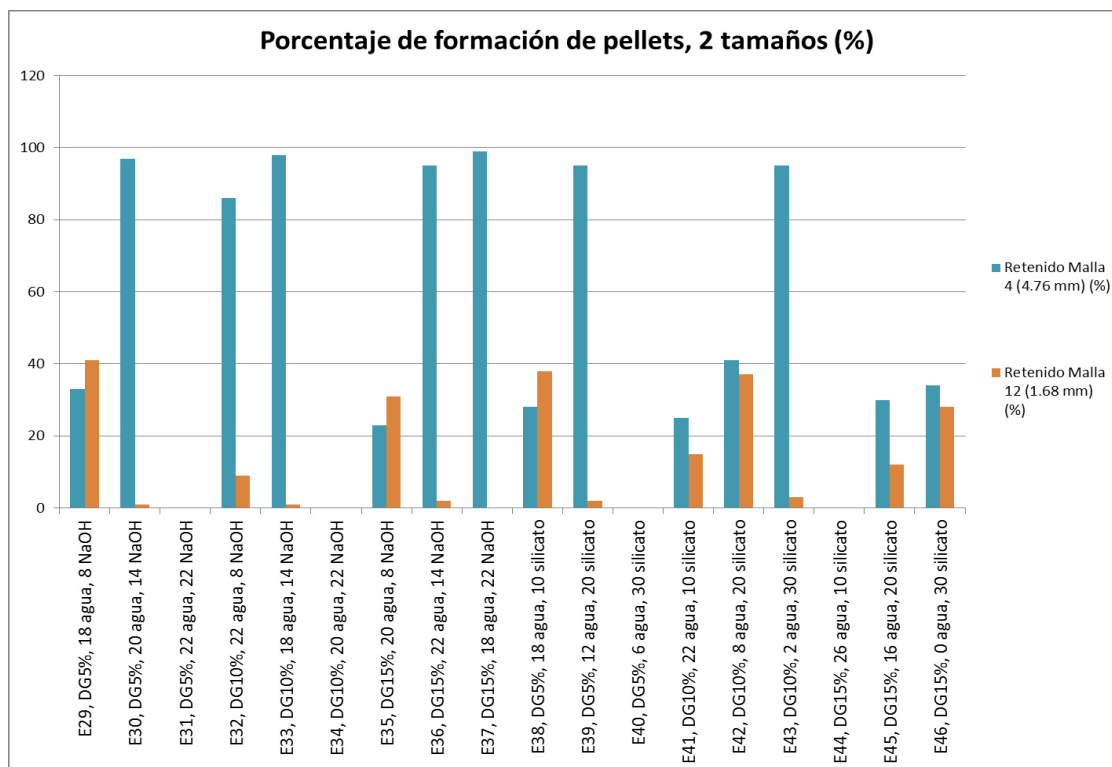


Figura 29, porcentaje de formación de pellets, dos tamaños.

3.3.3.3. Resistencia a la carga.

En esta evaluación también el bloque de experimentos con NaOH tuvo mejor desempeño que el del silicato, presentando una resistencia a la carga promedio de 1.8 Kg para el primero y 0.4 Kg para el segundo.

Todos los pellets del bloque 1 tuvieron buena resistencia, soportando al menos 1.5 Kg de carga sobre ellos. Los resultados se muestran en la figura 30.

En el bloque 2 los pellets tendían a formarse aparentemente bien, pero al secarse cambiaba su apariencia y su resistencia. Si bien no se deshicieron durante el secado, tal como se comentó en el punto 3.3.2.3 “Experimentos con 20 al 50% de DG como

vitrificante”, sí fue notable su baja resistencia, de manera que al presionarlos levemente, se desmoronaban.

Tampoco se encontró ninguna relación entre resistencia y cantidad de agua, silicato de sodio o hidróxido de sodio.

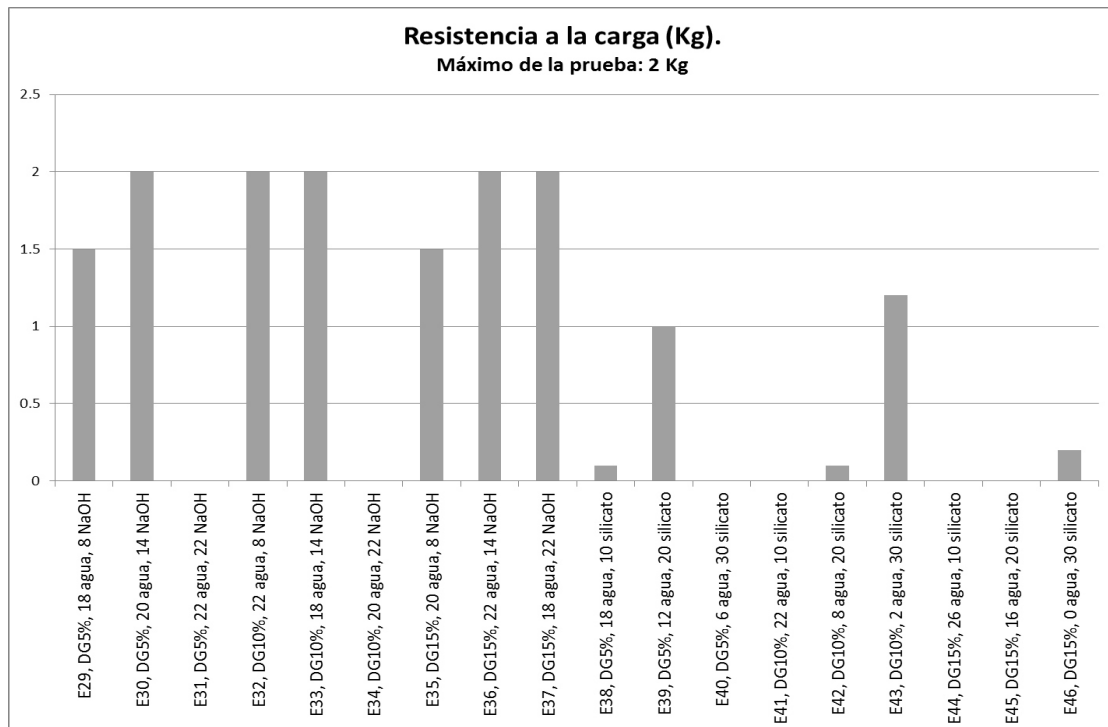


Figura 30, gráfica de resistencia a la carga de los pellets.

3.3.3.4. Resistencia a las caídas.

Igualmente en esta evaluación, con el bloque 1 se tuvo mejor desempeño que el bloque 2, tal como se puede apreciar en la figura 31.

Todos los pellets del bloque 1 resistieron las 10 caídas de la prueba, mientras que de los dos experimentos evaluados del bloque 2, sólo uno de ellos pasó la prueba.

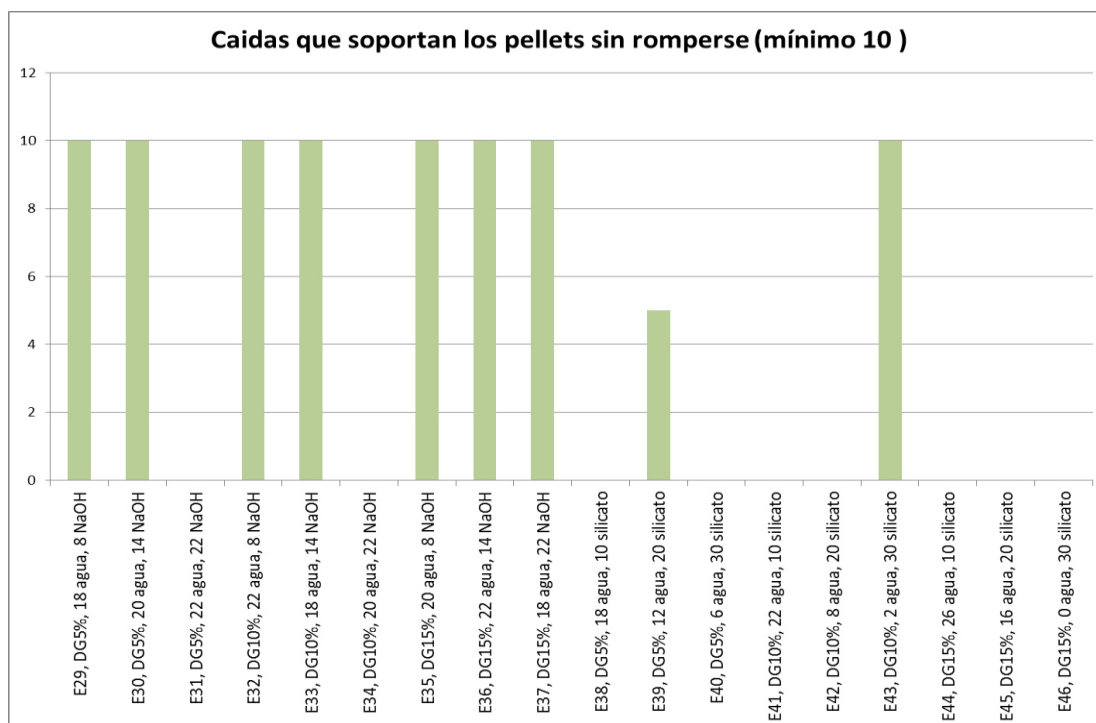


Figura 31, gráfica de resistencia a las caídas de los pellets.

3.3.3.5 Prueba de vibración.

De los pellets obtenidos en el bloque 1, se tuvo un resultado con prácticamente cero pérdidas por vibración (experimento #37), el máximo fue de 19% de pérdida en peso por esta prueba, como se puede observar en la figura 32.

En este caso sí se puede observar correlación entre la cantidad de hidróxido de sodio y resistencia a la prueba de vibración, de manera que en el nivel “bajo” (8% de hidróxido de sodio), se presentaron los resultados con mayor desgaste, con el nivel “medio” de hidróxido (14%), los valores de desgaste por vibración fueron mejores, y el mejor resultado fue en el nivel “alto” de hidróxido (22%). No se aprecia correlación con agua o porcentaje de DG.

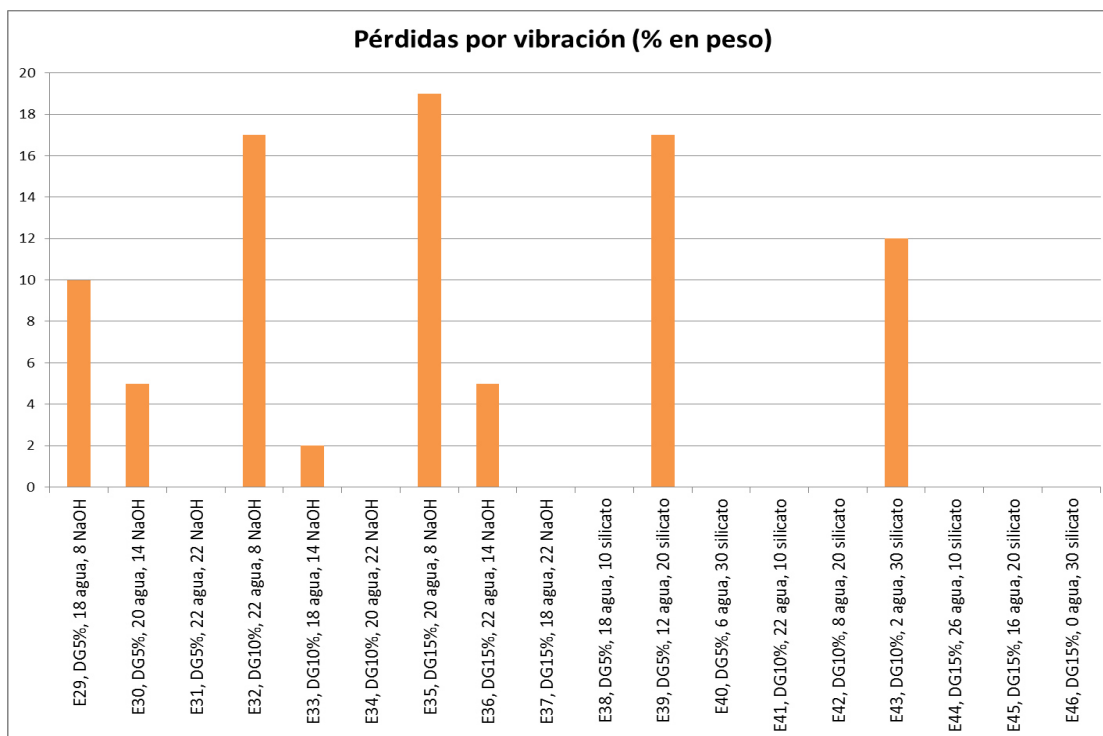


Figura 32, gráfica de las pérdidas por vibración de los pellets.

3.3.3.5 Resultados completos de pruebas de pelletización.

En la tabla XVI se presentan los resultados completos de todas las pruebas de pelletización realizadas, desde las preliminares hasta las del diseño de experimentos, incluyendo algunas observaciones y todas las evaluaciones realizadas.

Tabla XVI. Resultados completos de todas las pruebas de pelletización realizadas

Número de experimento	Materias primas sólidas (gr)	Vitrificante		Ligantes			Comentarios	
		% Desecho Geotérmico	% arena	% silicato en solución acuosa al 50%	% agua extra	% NaOH en solución acuosa al 25%	Formación de los pellets	Apariencia de humedad
1	100		100	21	19.5		Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo
2	100		100	12	16		Bien formados	Bien
3	100		100	12	21		Bien formados	Bien
4	100		100	9	20.7		Bien formados	Bien
5	100		100	7	12.1		Bien formados	Bien
6	100	50	50	7	47.2		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien
7	100	50	50	8	56		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Muy húmedos
8	100	50	50	10	42.3		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Muy húmedos
9	100	50	50	20	32.4		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	faltó agua
10	100	50	50	14.2	36		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	faltó agua
11	100	100		28.6	74		Se deshacen al levantarlos secos	Bien
12	100	100		14.6	84.5		Bien formados	Bien
13	50	100		NO	94		Bien formados	Bien
14	50	100		8.6	96		Bien formados	Muy húmedos
15	50	100		4.8	96.4		Bien formados	Bien
16	100		100	5.1	13.1		Se deshacen fácilmente, pero se pueden manipular	Bien
17	50		100	9	20.8		Bien formados	Bien
18	50	10	90	9.2	25.6		Se deshacen al levantarlos secos	Bien
19	50	20	80	10.6	28.6		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien
20	50	30	70	9.2	30.6		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien
21	50		100		14.4	14	Bien formados	Bien
22	50		100		13	18.4	Bien formados	Muy húmedos
23	50	10	90		22.2	9.8	Bien formados	Bien
24	50	10	90		12.2	22.4	Bien formados	Bien
25	50	30	70		40.4	9.6	Se formaron pellets, se deshicieron muchos al secarse	Bien
26	50	30	70		29.6	21.2	Bien formados	Bien
27	50	10	90	19.4	19		Pellets muy grandes pero bien formados.	Muy húmedos
28	50	5	95	20	15		Bien formados	Muy húmedos
29	50	5	95		18	8	Bien formados	Bien
30	50	5	95		20	14.4	Bien formados	Bien
31	50	5	95		22	22	Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo
32	50	10	90		22	8.2	Bien formados	Bien
33	50	10	90		18	14	Bien formados	Bien
34	50	10	90		20	22	Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo
35	50	15	85		20	8	Pocos pellets, faltó agua	faltó agua
36	50	15	85		22	14	Bien formados	Bien
37	50	15	85		18	22	Bien formados	Bien
38	50	5	95	10	18		Bien formados	Bien
39	50	5	95	20	12		Bien formados	Bien
40	50	5	95	30	6		Plastas, no se formaron pellets por exceso de agua	Excesivo
41	50	10	90	10	22		Se formarán ojuelas al secarse.	Bien
42	50	10	90	20	8		Pocos pellets, faltó agua	faltó agua
43	50	10	90	30	2		Bien formados	Bien
44	50	15	85	10	26		Se formaron pellets, pero se deshicieron al secarse.	Bien
45	50	15	85	20	16		Bien formados	Bien
46	50	15	85	30	0		Bien formados	Bien

Tabla XVI. (continuación)

Número de experimento	Humedad				Granulometría			Granulometría			Resistencia		Prueba de Vibración		
	Peso inicial de pellets (gr)	Peso 24 horas después (gr)	Peso después de 4 h en estufa a 121°C (gr)	Humedad inicial de los pellets (%)	Retenido Malla 4 (gr)	Retenido Malla 12 (gr)	Pasa Malla 12 (gr)	Retenido Malla 4 (%)	Retenido Malla 12 (%)	Pasa Malla 12 (%)	Peso soportado sin romperse -secos- (Kg)	Cargas que soportan (Min 10)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Erosión calculada (%)
1															
2											2				
3											2				
4											2				
5											2				
6											0				
7											0				
8											0				
9											0				
10											0				
11											0				
12											1				
13											1				
14											1.5				
15											1				
16											0.1				
17											1.7				
18											0				
19											0				
20											0				
21											2				
22											2				
23											2				
24											2				
25											1.2				
26											1.5				
27											1.5				
28											1.2				
29	60.32	54.3	49.71	18%	15.17	19.1	12.02	33%	41%	26%	1.5	10	13.18	11.88	10%
30	57.08	48.8	43.7	23%	39.1	0.46	0.56	97%	1%	1%	2	10	38.8	36.98	5%
31															
32	64.29	27.7	52.68	18%	42.36	4.51	2.28	86%	9%	5%	2	10	41.1	33.99	17%
33	58.87	52.9	47.67	19%	43.5	0.55	0.53	98%	1%	1%	2	10	42.95	42.1	2%
34															
35	60.58	54	49.69	18%	10.59	14.34	21.34	23%	31%	46%	1.5	10	8.37	6.74	19%
36	62.4	56.1	50.12	20%	44.01	0.96	1.58	95%	2%	3%	2	10	43.91	41.65	5%
37	59.3	53.7	48.32	19%	45.46	0.22	0.32	99%	0%	1%	2	10	45.48	45.28	0%
38	59.18	52.39	49.18	17%	12.9	17.58	15.52	28%	38%	34%	0.1	0			
39	57.7	52	47.5	18%	42.17	0.73	1.34	95%	2%	3%	1	5	33.777	28.14	17%
40															
41	62.39	54.45	50.18	20%	11.62	7.11	28.11	25%	15%	60%	0	0			
42	61.61	55.22	51.19	17%	19.54	17.85	10.71	41%	37%	22%	0.1	0			
43	64.42	58.98	53.22	17%	47.26	1.61	1.13	95%	3%	2%	1.2	10	45.35	39.777	12%
44	62.69	55.12	49.2	22%											
45	58.81	51.82	46.75	21%	13.03	5.39	24.87	30%	12%	57%	0	0			
46	67.67	62.5	55.83	17%	17.77	14.96	19.99	34%	28%	38%	0.2	0			

3.4 Experimentos de fusión de los pellets formados.

La prueba final de este proyecto fue la fusión de los pellets formados. La intención fue evaluar si este material se podía tratar como la mezcla de materias primas normales del proceso, así como evaluar si los vidrios obtenidos presentaban defectos derivados de la sílice amorfa del desecho geotérmico, así que se realizaron 7 pruebas de fusión con los pellets formados, tanto con materias primas sin incluir DG (fusiones de pellets de experimentos #3, 4a y 4b), materias primas pero sustituyendo la arena con 100% DG (fusiones de pellets de experimentos #12 y 13) y materias primas más vitrificante mezclado 10 y 15% DG con arena sílica (fusiones de pellets de experimentos #37 y 43), las cuales fueron los dos experimentos que tuvieron mejores resultados en las pruebas de pelletización, el número 37 fue con hidróxido de sodio y el número 43 fue con silicato de sodio. En la figura 33 se muestran fotografías de estas fusiones.

En todos los casos se formaron vidrios de apariencia similar a los obtenidos en otras pruebas de fusión a nivel laboratorio. Éstos se observaron en el microscopio óptico, sin encontrar residuos de sílice amorfa en su estructura o algún otro defecto que se pudiera atribuir al DG, con lo que se comprueba que este material se puede fundir en condiciones similares al proceso de fabricación de vidrio flotado, aunque es necesario llevar a cabo más análisis a los vidrios obtenidos para verificar que sus características cumplen con todas las especificaciones requeridas para cada uno de los mercados en los que se comercializa nuestro vidrio.



(a) crisol en mirilla. (b) vaciado de vidrio fundido (c) Crisol y vidrio fríos.

Figura 33, experimentos de fusión de los pellets.

CAPITULO 4.

4.1 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

4.1.1 Conclusiones.

La muestra DG #1 (sílice de 92.5%) cumplió las especificaciones de composición después de 5 etapas de lavado, mientras que la muestra DG #2 (sílice 41.8%) no cumplió consistentemente. Es necesario especificar un contenido mínimo de sílice cercano al 90% para la materia prima que se utilizaría en este proceso a nivel industrial.

El lavado del DG con granos mayores a 4 mm no fue tan efectivo como en las partículas menores a 1 mm, por lo que también se recomienda una especificación de tamaño de partícula máximo.

Los pellets verdes no tienen la resistencia adecuada para manipularlos en un proceso con lotes a nivel industrial. Una opción es colectarlos en una banda móvil debajo del disco pelletizador para ser transportados directamente a un equipo de secado para lograr una dureza aceptable.

El aglomerante que claramente dio mejores resultados fue el hidróxido de sodio, cumpliendo los requerimientos de porcentaje de pelletización y dureza de los pellets secos. Los pellets elaborados con silicato de sodio presentaron problemas en su desempeño, dando resultados que no son aceptables a nuestro proceso.

No se apreciaron tendencias claras para el contenido de agua o el porcentaje de sustitución del DG dentro del rango del diseño de experimentos, por lo que en siguientes

etapas se recomienda utilizar del 5 al 15% de DG en lugar de arena y del 18 al 22% de agua. Para el hidróxido de sodio sí se tuvieron diferencias entre los tres niveles probados, obteniendo los mejores resultados con un nivel alto de este material (22%). Los pellets formados con el nivel “medio” de hidróxido (14%) también tuvieron resultados satisfactorios, por lo que se consideraría a futuro una evaluación del costo-beneficio entre los valores medio y alto en esta variable.

El vidrio fundido con los pellets no presentó defectos de sílice amorfa o algún otro relacionado con el DG. Los pellets se lograron fundir en condiciones similares a las utilizadas con la materia prima normal del proceso.

La conclusión global es que se encontraron los tratamientos necesarios para convertir al DG en materia prima para la fabricación de vidrio flotado, siempre y cuando este material crudo cumpla ciertos requerimientos de pureza y granulometría.

4.1.2 Trabajo futuro:

- Llevar a cabo pruebas de pelletización con solución acuosa de hidróxido de sodio entre 14 y 22% y evaluar costo-beneficio para determinar la mejor condición a nivel de prueba piloto. También es conveniente evaluar la utilización de agua como ligante, en un proceso semicontínuo de alimentación de pellets al horno.
- Realizar análisis de velocidad de fusión, consumo energético y generación de burbujas en vidrio al utilizar pellets con DG.

- Llevar a cabo pruebas de propiedades ópticas, intemperismo, resistencia mecánica, etc. del vidrio obtenido al fundir los pellets.
- Realizar pruebas para determinar el tratamiento necesario para la disposición de las aguas residuales.
- Análisis de costo y escalamiento a nivel industrial, incluyendo horno para secado de pellets.

BIBLIOGRAFIA

1. Bertani, R. Geothermal Energy (2008) C. Clini et al. (eds.), Sustainable Development and Environmental Management: Experiences consolidated. Case Studies, 207-219. Ed Springer.
2. Guerrero-Lemus, R. Martínez-Duart, J.M. (2013) Renewable Energies and CO₂, Lecture Notes in Energy 3, DOI 10.1007/978-1-4471-4385-7_10,
3. Shortall, R. D. Sottir, D. Axelsson, G. (2015) Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. Renewable and Sustainable Energy Reviews 44, pp 391–406
4. Eliasson, E. T., Thorhallsson, S. y Steingrímsson, B. (2011). Geothermal Power Plants, Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants, United Nations University
5. Lund, J. W., Boyd, P.E. and Boyd, T. L. Research on the use of waste silica from the Cerro Prieto geothermal field, Mexico. Progress report, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology
6. Lid, M. S., Bohenek, M., Premuzic, E.T., Johnson, S.D. (2000). Silica Production from low-Salinity Geothermal Brines. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 24, September 24-27, 2000.
7. Fernández-Navarro, J. M. (1991) El Vidrio, 2a Ed, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Fundación Centro Nacional del Vidrio.
8. Pilkington Glass Limited, (2000), Manuales técnicos del “Melting, forming, annealing and cutting line Training Course”
9. NCNG (2012). Glass technology course, Netherlands.
10. Cochrane, G. (2011) Melting trainig course,

11. Brower, P. (2010) Teoría de FRX. Panalytical.
12. Leng, Y. (2008). Materials Characterization, Ed. John Wiley and sons Pte Ltd.
13. Jenkins, R. Snyder, R., (1996), Introduction to X-Ray Powder Diffractometry. Ed Wiley. 432 pag.
14. Ramachandra S.V. and Beaudion J. J.. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, U.S.A.
15. Barbosa-Cánovas, G., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H., (2005) Food Powders, physical properties, processing and functionality, cap 7: size enlargement. Kluwer Academic / Plenum Publishers EUA.
16. Ortega-Rivas, E. (2012). Non thermal food engineering operations, cap 5 food enlargement, Ed Springer
17. Kaminska, J., Danko, J., (2011). Analysis of the granulation process mechanism stand and scope of experimental investigations. Metallurgy and foundry eng 37.
18. Newitt, D. M. Conwey-Jones J. M., (1958) A contribution to the theory and practice of granulation, Transaction, Institution of Chemical Eng., 36, pp 422-442.
19. Matveev, M. A., Demidovich, B. K., (1967) Formation of granules in glass batch. Steklo I keramika, No 10, pp20-23.
20. Nold, P., Lobe, R., Muller, M. (2003) Granule production- easy and cost effective. State of the art papers by Eirich GmbH.
21. Vargas, G., Fernández, A., Hernández, E., De Luna, G. (2014). Proyecto Vitro: Desarrollo de un nuevo proceso de aglomeración (pelletizing) de materias primas con impacto significativo al medio ambiente Vitro-Cinvestav.

22. Cooper, J. (1977). Glass batch pelletizing method Patent US 4031175A
23. Gründer, W, y Hilderbrand, H. (1961): Chem. Ing, Techn, 33 (11), p.749.
24. Rongen, M., Limpt, H., Marson, P., (2013) Advantages of pelletized raw materials
Mathi Rongen, 23rd International Congress on Glass. Prague, 1 – 5 July 2013
25. Rongen, M. Limpt, H. (2014) Pelletability and compactability of industrial glass
batches. GT10 Project Report from Science and Technology in glass industry
26. Diaz C, Rincon JM. (1990) Tratamiento químico de la escoria de sílice de una
planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. Boletín de la Cociudad
Española de Cerámica y Vidrio 181-184.
27. Gómez-Zamorano, L.Y, Escalante-García J.I, Mendoza-Suárez, G. (2004)
Geothermal waste: An alternative replacement material of Portland cement. Journal
of materials science 39, pp 4021 – 4025
28. Diaz, C., Torres Martínez L.M., Garza, L., Avalos-Borja, M., Rincón, J.M. (1993).
Turning Geothermal waste into glasses and glass ceramics. American Ceramic
Society Bulletin, 72 (10). 81-82.
29. Rincón,J. M., Romero, M., Diaz,C., Balek V. and Malek, Z.. (1999)Thermal
behaviour of silica waste from a geothermal power station and derived silica
ceramics. Journal of thermal Analysis and Calorimetry, vol 56, pp 1261-1269.
30. Steinour, H. (1946) The systema CaO-SiO₂-H₂O and the hydration of the calcium
silicates. Portland Cement Association.

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Alberto Solís Oba.

Candidato para el Grado de
Maestro en Ciencias con Especialidad en Materiales

Tesis: UTILIZACIÓN DEL DESECHO DE SÍLICE DE LA GEOTÉRMICA DE
CERRO PRIETO EN LA FABRICACIÓN DE VIDRIO FLOTADO.

Campo de Estudio: Ingeniería.

Biografía:

Datos Personales: Nacido en México DF el 1 de enero de 1968, hijo de Roberto
Solis y Consuelo Oba.

Educación:

Egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana, grado obtenido:
Licenciatura en química en 1990.

Experiencia Profesional:

Laboratorista químico en PPG industries de 1990 a 1996.

Ingeniero de procesos e ingeniero en tecnología en GrupoVitro de 1996 a la
fecha.